

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rūta STAPULIONIENĖ

TERMOIZOLIACINIO KOMPOZITO IŠ PLUOŠTINIŲ AUGALŲ KŪRIMAS IR TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2016

Disertacija rengta 2012–2016 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

dr. Saulius VAITKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
medžiagų inžinerija – 08T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties
disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

dr. Rimvydas STONYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

dr. Olga KIZINIEVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
medžiagų inžinerija – 08T),
dr. Janis RIŽIKOVS (Latvijos valstybinis medienos chemijos institutas,
chemijos inžinerija – 05T),
dr. Audronė SANKAUSKAITĖ (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas
Fizinių ir technologijos mokslų centras, chemija – 03P),
doc. dr. Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties
disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2016 m. birželio 6 d. 10 val.** Vilniaus
Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2016 m. gegužės 5 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus
Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223
Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2367-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-69-457-929-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2016

© Rūta Stapulionienė, 2016

ruta.stapulioniene@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rūta STAPULIONIENĖ

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THERMAL INSULATING COMPOSITE FROM FIBROUS PLANTS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2016

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2016.

Supervisor

Dr Saulius VAITKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Dr Rimvydas STONYS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr Olga KIZINIEVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),

Dr Janis RIZIKOVŠ (Latvian State Institute of Wood Chemistry, Chemical Engineering – 05T),

Dr Audronė SANKAUSKAITĖ (State research institute Center for Physical Sciences and Technology, Chemistry – 03P),

Assoc. Prof. Dr Gintautas SKRIPKIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 6 June 2016**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 5 May 2016.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziiumė

Disertacijoje nagrinėjamos natūralių pluoštų ir termoizoliacinių kompozitų iš natūralių pluoštų savybės. Pagrindiniai tyrimo objektai yra natūralūs pluoštai: ilgasis ir trumpasis kanapių ir linų pluoštas kompozito struktūrai formuoti, du rišikliai – polilaktido (PLA) ir durpių pluoštas; pluoštinis kompozitas, sudarytas iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio bei pluoštinio kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir durpių pluošto rišiklio. Detaliai išanalizavus jų savybes, galima suformuoti efektyvų kompozitą, pasižymintį geromis šilumos izoliavimo savybėmis. Pagrindinis disertacijos tikslas – parinkti tinkamai apdorotą natūralų pluoštą kompozitui formuoti, nustatyti technologinius parametrus bei priedų (hidrofobizatorių ir antipirenų) tipus ir jų kiekius.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikta bendra informacija apie natūralių pluoštų klasifikavimą. Apžvelgti moksliniai tyrimai apie pluoštų cheminės sudėties tyrimų rezultatus, jų struktūros analizę, pluoštų atskyrimo būdus. Šiame skyriuje taip pat analizuojamos natūralių pluoštų kompozitų su įvairiomis rišamosiomis medžiagomis, savybės. Apžvelgta literatūra, susijusi su tyrimams naudotomis rišamosiomis medžiagomis, detaliau išanalizuotas PLA ir durpių pluoštas. Skyriaus pabaigoje suformuluotos išvados ir patikslinti disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašytos tyrimams naudotos medžiagos ir pluoštinio kompozito formavimo technologija. Taip pat apibūdinti taikyti tyrimų metodai ir naudota įranga.

Trečiajame skyriuje pateikti natūralių pluoštų savybių tyrimų struktūros analizės rezultatai. Ištirtas natūralių pluoštų, skirtingai apdorotų mechaniniais būdais, poveikis šilumos laidumui, parinktas kanapių pluoštas kompozitui formuoti. Taip pat ištirtos kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio, fizikinės ir mechaninės savybės, nustatytas optimalus rišiklio kiekis, technologinių parametrų, priedų poveikis pluoštinio kompozito fizikinėms ir mechaninėms savybėms. Ištirta pluoštinio kompozito makro- ir mikrostruktūra. Šiame skyriuje taip pat pateikta kompozito iš kanapių ir durpių pluošto savybių bei struktūros analizė.

Disertacijos tema paskelbti keturi straipsniai: vienas – mokslo žurnale įtraukta į Thomson Reuters Web of Science leidinių sąrašą, turinčiame citavimo indeksą, du – tarptautinės duomenų bazės mokslo žurnaluose, vienas – recenzuojamoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos medžiagoje. Disertacijos tema perskaityti 5 pranešimai Lietuvos ir kitų šalių konferencijose.

Abstract

Properties of natural fibres and thermal insulating composites from natural fibres are analysed in the thesis. The main objects of the research are natural fibres: long and short hemp as well as flax fibres for the formation of composite structure, two binding materials – polylactide (PLA) and peat fibres; fibrous composite made from hemp and binding material – PLA as well as hemp and binding material – peat fibres. Their detail analysis allows formation of effective composite characterised by sufficient thermal insulating properties. The main aim of the thesis is proper selection of natural fibres for the formation of composite, technological parameters, additive (hydrophobizers and fire retardants) types and their concentrations.

The thesis consists of introduction, three chapters, general conclusions, references and the list of author's publications related to thesis topic list.

The first chapter is designed for literature analysis. It presents general information about the classification of natural fibres. This chapter as well presents science research about results of the chemical composition and analysis of structure of fibres and properties analysis of composites from natural fibres and binding materials. The review also covers the literature related to binding materials used for the research and detail analysis of PLA and peat fibres. Conclusions and specified objectives are formulated at the end of this chapter.

Second chapter consists of description of materials used for the research, forming technology of fibres composite. The conducted methods and equipment are presented as well.

Third chapter presents the research results of natural fibres properties and structure analysis. Impact of differently mechanically treated natural fibres on thermal conductivity is investigated; hemp fibres for the formation of composite are selected. Physical and mechanical properties of composite made from hemp fibres and PLA binder is examined, optimal amount of binding material, impact of technological parameters, additives on physical-mechanical properties of fibrous composite are determined. The macro- and microstructures of fibrous composite are investigated as well. This chapter presents properties and structure analysis of composite from hemp and peat fibres.

4 scientific articles are published on the topic of the dissertation: one in scientific journal included in the Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science) with a citation index, two – in scientific journals of international databases; one – in the Lithuanian conference proceedings. Results of this thesis were presented in 5 conferences in Lithuania and other countries.

Žymėjimai

Simboliai

- A_p – bandinio apatinio paviršiaus plotas, m²;
 b_0, b_1, b_2 – pastovieji koeficientai;
 d – bandinio storis, mm;
 E – tamprumo modulis, kPa;
 f – bangų sklidimo dažnis, Hz;
 \bar{Y}_x – įvertinamo parametro vidutinė vertė;
 m_0 – pradinė bandinio masė, kg;
 m_{24} – bandinio masė, palaikius jį iš dalies panardintą vandenyje 24 val, kg;
 n – eksperimentinių duomenų skaičius;
 R – determinacijos koeficientas;
 S_r – vidutinis kvadratinis nuokrypis;
 V/H – hidrofobinės medžiagos ir vandens kiekio santykis apdorojant bandinius, g/l;
 W_p – trumpalaikė vandens sugertis, kg/m² arba % pagal masę;
 X – kinamasis arba nustomasis parametras tankis;
 α – garso sugerties koeficientas;
 $\bar{\lambda}_{10^\circ C}$ – vidutinė šilumos laidumo koeficiento vertė vidutinėje 10 °C temperatūroje, W/(m·K);
 μ – santykinė garinė varža;
 ρ – pluoštų bandinių tankis, kg/m³;

$\sigma_{10\%}$ – gniuždymo įtempis, kPa.

Santrumpos

PLA – polilaktido pluoštas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	4
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	6
Padėka	6
 1. MEDŽIAGŲ IŠ PLUOŠTINIŲ AUGALŲ PANAUDOJIMO TERMOIZOLIACINIŲ KOMPOZITŲ GAMYBOJE APŽVALGA	 7
1.1. Pluoštų klasifikavimas.....	7
1.2. Gamtiniai karnienos pluoštai	9
1.3. Natūralių pluoštų (linų, kanapių) cheminė sudėtis ir struktūra.....	10
1.4. Pluošto atskyrimas.....	12
1.5. Medžiagų iš atsinaujinančių išteklių naudojimas šilumos izoliacijai	13
1.6. Medžiagų iš atsinaujinančių išteklių naudojimas garso izoliacijai.....	16

1.7. Natūralių pluoštų ir jų kompozitų degumo savybės	17
1.8. Natūralių pluoštų ir jų kompozitų drėgminės savybės.....	19
1.9. Kompozitų iš natūralių pluoštų stiprumo rodikliai	20
1.10. Natūralių pluoštų kompozitų rišikliai	21
1.11. Kompozitų iš natūralių pluoštų formavimo technologija	24
1.12. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	25
2. NAUDOTŲ MEDŽIAGŲ BEI NATŪRALIŲ PLUOŠTŲ IR JŲ KOMPOZITŲ TYRIMŲ METODAI	27
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos	27
2.1.1. Natūralūs pluoštai klando formavimui	27
2.1.2. Rišikliai.....	30
2.1.3. Priedai	30
2.2. Kompozitų paruošimas tyrimams	31
2.2.1. Kompozito iš kanapių ir durpių pluoštų sudėtis ir formavimo technologija	31
2.2.2. Kompozito iš kanapių ir polilaktido pluoštų sudėtis ir formavimo technologija	32
2.3. Natūralių pluoštų ir jų kompozitų savybių nustatymo metodikos	34
2.3.1. Struktūros tyrimai	34
2.3.2. Šilumos laidumo tyrimai.....	35
2.3.3. Mechaninių savybių tyrimai	35
2.3.4. Garso sugerties koeficiento nustatymas.....	36
2.3.5. Trumpalaikės vandens sugerties nustatymas	37
2.3.6. Pralaidumo vandens garams nustatymas.....	38
2.3.7. Degumo tyrimai	39
2.3.8. Eksperimentinių tyrimo rezultatų statistinis apdorojimas	40
2.4. Antrojo skyriaus išvados	41
3. PLUOŠTŲ IR JŲ KOMPOZITŲ STRUKTŪRINIŲ, ŠILUMINIŲ IR STIPRUMINIŲ RODIKLIŲ EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI	43
3.1. Medžiagų iš natūralių pluoštų struktūros tyrimai	44
3.1.1. Natūralių pluoštų makro- ir mikrostruktūra	44
3.1.2. Polilaktido pluošto makro- ir mikrostruktūra.....	50
3.2. Medžiagų iš natūralių pluoštų šilumos laidumo tyrimai.....	51
3.2.1. Natūralių pluoštų šilumos laidumas	51
3.2.2. Polilaktido pluošto šilumos laidumas	61
3.3. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir durpių pluošto rišiklio, savybių eksperimentiniai tyrimai	62
3.3.1. Kompozito su durpių pluošto rišikliu struktūra	62
3.3.2. Kompozito su durpių pluošto rišikliu šilumos laidumas.....	63
3.4. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir polilaktido pluošto rišiklio, savybių eksperimentiniai tyrimai	64
3.4.1. Kompozito su polilaktido pluošto rišikliu struktūra.....	64

3.4.2. Kompozito mechaninių rodiklių tyrimai veikiant trumpalaikėmis apkrovomis	65
3.4.2.1. Kompozito gniuždymo tyrimai ir pluoštų orientacijos poveikio gniuždymo stipriui įvertinimas.....	66
3.4.2.2. Kompozito tempimo tyrimai	72
3.4.3. Kompozito šilumos laidumo koeficiento nustatymas	74
3.4.4. Kompozito garso sugerties koeficiento nustatymas	78
3.4.5. Kompozito vandens sugerties tyrimai.....	81
3.4.5.1. Hidrofobizatoriaus parinkimas kompozitui	82
3.4.5.2. Kompozito trumpalaikės vandens sugerties rezultatų statistinis apdorojimas	84
3.4.6. Kompozito pralaidumo vandens garams tyrimai	88
3.4.7. Kompozito degumo tyrimai	89
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	93
 BENDROSIOS IŠVADOS	 97
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	99
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ...	109
SUMMARY IN ENGLISH.....	111
PRIEDAI ¹	127
A priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	130
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	131

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
Object of the thesis	3
The aim of the thesis	4
The objectives of the thesis	4
Research methodology	4
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings.....	5
Defended statements	5
Approval of the research findings	6
Structure of the dissertation.....	6
Gratitude	6
 1. REVIEW OF THE USE OF MATERIALS FROM FIBROUS PLANTS FOR THERMAL INSULATING COMPOSITES MANUFACTURE.....	 7
1.1. Classification of fibres.....	7
1.2. Natural bast fibres	9
1.3. Chemical composition and structure of natural fibres (flax, hemp)	10
1.4. Separation of fibres	12
1.5. The use of materials from renewable resources for thermal insulation	13
1.6. The use of materials from renewable resources for sound insulation.....	16

1.7. Flammability properties of natural fibres and their composites	17
1.8. Moisture properties of natural fibres and their composites	19
1.9. Strength indicators of the composites from natural fibres	20
1.10. Binders for the composites from natural fibres	21
1.11. Forming technology of the composites from natural fibres	24
1.12. Conclusions of the first chapter and formulation of the objectives of the dissertation	25
 2. MATERIALS AND RESEARCH METHODS OF NATURALS FIBRES AND THEIR COMPOSITES	27
2.1. Raw materials used for investigations	27
2.1.1. Natural fibres	27
2.1.2. Binders	30
2.1.3. Additives	30
2.2. Preparation of the composites for investigations	31
2.2.1. Composition and forming technology of the composite from hemp and peat fibres	31
2.2.2. Composition and forming technology of the composite from hemp and polylactide fibres	32
2.3. Investigation methods of naturals fibres and their composites	34
2.3.1. Investigations on structure	34
2.3.2. Investigations on thermal conductivity	35
2.3.3. Investigations on mechanical properties	35
2.3.4. Determination of coefficient of sound absorption	36
2.3.5. Determination of short term water absorption by partial immersion	37
2.3.6. Determination of water vapour transmission properties	38
2.3.7. Determination of the flammability investigations	39
2.3.8. Statistical evaluation of experimental results	40
2.4. Conclusions of the second chapter	41
 3. RESULTS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF STRUCTURAL, THERMAL AND STRENGTH INDICATORS OF FIBRES AND THEIR COMPOSITES	43
3.1. Investigations on structure of materials from natural fibres	44
3.1.1. Investigations on macro- and microstructures of natural fibres	44
3.1.2. Investigations on macro- and microstructures of polylactide fibres	50
3.2. Investigations on thermal conductivity of materials from renewable resources	51
3.2.1. Investigations on thermal conductivity of natural fibres	51
3.2.2. Investigations on thermal conductivity of polylactide fibres	61
3.3. Experimental investigations on properties of the composite from hemp fibres and peat fibres binder	62
3.3.1. Investigations on structure of composite	62
3.3.2. Investigations on thermal conductivity of composite	63
3.4. Experimental investigations on properties of the composite from hemp fibres and polylactide fibres binder	64

3.4.1. Investigations on structure of composite	64
3.4.2. Investigations on mechanical indicators of composite acting short-term loads	65
3.4.2.1. Investigations on compressive strength of composite and evaluation of fibres orientation impact on compressive strength	66
3.4.2.2. Investigations on tensile strength of composite	72
3.4.3. Determination of thermal conductivity of composite	74
3.4.4. Determination of sound absorption coefficient of composite	78
3.4.5. Investigations on water absorption of composite	81
3.4.5.1. Selection of hydrophobizators for composite	82
3.4.5.2. Mathematical-statistical evaluation of experimental results of short-term water absorption of composite	84
3.4.6. Investigations on water vapour transmission of composite	88
3.4.7. Investigations on flammability	89
3.5. Conclusions of the third chapter	93
 GENERAL CONCLUSIONS	 97
 REFERENCES	 99
 LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS OF THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	 109
 SUMMARY IN ENGLISH.....	 111
ANNEXES ¹	127
Annex A. Agreements of co-authors to provide published materials in the dissertation	130
Annex B. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	131

¹ The annexes are supplied in the enclosed compact drive

Išvadas

Problemos formulavimas

Pastaruoju metu vis populiarėja natūralūs pluoštai ir didėja jų reikšmė pramonėje. Yra apie 100 rūšių augalų, turinčių ilgą ir stiprų pluoštą, tinkamą pramoniniam perdirbimui, ir galinčių augti vidutinio klimato sąlygomis. Lietuvos gamtinės sąlygos palankios augti šiems pluoštiniais augalams: linams, kanapėms, dilgėlėms, apyniams ir kt. Linų ir kanapių pluoštas yra vieni iš plačiausiai naudojamų augalinių pluoštų. Šie pluoštai per šimtmečius buvo naudojami burėms ir kitiems stipriems audiniams austi, virvėms bei popieriui gaminti. Per pastaruosius du dešimtmečius natūralūs pluoštai vis plačiau naudojami ir šilumos izoliavimo medžiagoms gaminti. Buvo atkreiptas dėmesys į geras pluoštų termoizoliacines savybes, lyginant su stiklo pluoštu, taip pat į mažesnį kiekį sunaudojamų cheminių medžiagų ir į dešimt kartų mažiau sunaudojamos energijos. Be to, produktas iš natūralių pluoštų gali būti perdirbamas keletą kartų, o galiausiai, kai tampa netinkamas perdirbti, jis yra lengvai utilizuojamas.

Lietuvoje linams tinkamų dirvožemių yra apie vienas milijonas hektarų, tačiau šis potencialas šiuo metu yra neišnaudojamas dėl tokių priežasčių:

- kaštai viršija už derlių gaunamas pajamas (auginant linus reikia penkis kartus daugiau darbo jėgos, negu auginant javus);

- trumpojo linų pluošto poreikio Lietuvoje šiuo metu nėra, naudojamas tik ilgasis pluoštas tekstilės pramonėje;
- pigus pluošto ir lininių gaminių importas iš trečiųjų šalių.

Kanapės (*Canabis sativa L.*) yra viena iš seniausiai auginamų žemės ūkio kultūrų. Lietuvoje pluoštinių kanapių auginimas įteisintas 2014 metais. Taigi ne tik perdirbimo, bet ir auginimo patirties įgyta dar nedaug, nesama pakankamos platesnio panaudojimo pasiūlos, todėl šalyje dar nėra kanapių perdirbimo į pluoštą gamyklų. Lietuvoje kanapės dažniausiai auginamos sėkloms, iš kurių spaudžiamas aliejus. Ši gamyba nereikalauja tokių didelių investicijų kaip pluošto perdirbimo įranga. Tačiau dabartiniu metu Lietuvoje pluoštinių kanapių pasėlių plotai, skirti ne tik sėkloms, bet ir pluoštui, turi didėjimo tendenciją. 2014 metais auginta 1063 ha, iš kurių skirtų pluoštui buvo 308 ha, o 2015 metais – 1500 ha. Kanapės yra daug lengviau auginamos nei linai, ir pluošto derlius iš to paties sklypo ploto būna tris kartus didesnis.

Siekiant didinti pluoštinių kanapių auginimo tendenciją, kanapių pluoštą būtų galima panaudoti statybos pramonėje, kuriant efektyvią termoizoliacinę medžiagą. Tačiau, kad būtų galima energetiškai efektyvius ir inovatyvius produktus įdiegti statybos pramonėje, būtini moksliniai tyrimai, leidžiantys sukurti norimų eksploatacinių charakteristikų medžiagas.

Šiame darbe ištirta galimybė sukurti efektyvią termoizoliacinę medžiagą iš kanapių pluoštų, kuriems apdoroti pritaikomi įvairūs technologiniai veiksniai. Kanapių pluoštų ir jų kompozitų termoizoliacinės savybės galima pagerinti suformuojant optimalią makro- ir mikrostruktūrą. Todėl buvo tiriamas tokių technologinių veiksmų, kaip pluoštų mechaninis apdorojimas, kompozito terminis apdorojimas, poveikis pluoštų ir jų kompozitų struktūrai ir savybėms, taip pat – tokių priedų, kaip hidrofobizatorių ir antipirenų, poveikis kompozito fizikinėms ir mechaninėms savybėms.

Darbo aktualumas

Paskutiniuosius du dešimtmečius ekologiškų medžiagų ir gaminių pramonė visame pasaulyje sparčiai auga. Šios pramonės augimas susijęs su keletu veiksnių – aplinkosaugos aspektais, poveikiu aplinkai ir žmogaus sveikatai, iškastinių išteklių mažinimu ir medžiagų utilizavimu jų eksploatavimo ciklo pabaigoje. Aplinkosaugos klausimai lėmė didelį susidomėjimą naujomis kompozitinėmis medžiagomis, pagamintomis iš biologiškai skaidžių žaliavų, tokių kaip natūralūs pluoštai, kurie yra alternatyva sintetiniams pluoštams. Šiuo metu pritaikoma vis daugiau natūralių, gamtoje atsinaujinančių augalinės kilmės biologinių žaliavų – pluoštinių kanapių, linų, šiaudų, kukurūzų ir kt., iš kurių gaminami savaime irstantys gaminiai, pavyzdžiui: plokštės, dembliai, biopolimerai, bioplastikas. Eko-

loginį suderinamumą lemia tiek produkto bioskaidumas (sugebėjimas savaime suirti, supūti, veikiant natūraliems mikroorganizmams), tiek ir jo gamybos nenkenksmingumas.

Ekologiškos statybos tikslas – efektyviai naudoti aplinkos išteklius ir ekologinio projektavimo galimybes. Pagrindiniai principai yra šie:

- iškastinių išteklių naudojimo mažinimas;
- pakartotinis naudojimas;
- perdirbamų išteklių naudojimas;
- gamtos apsauga;
- toksinių medžiagų šalinimas.

Pluoštinių augalų naudojimas ekologiškoms statybinėms medžiagoms gaminti atitinka ekologiškų medžiagų pramonei keliamus reikalavimus.

Taigi panaudojus augalinės kilmės pluoštus – kanapes, atsirastų daugiau galimybių gaminti efektyvias, ekologiškas šilumos izoliavimo medžiagas, kurios padėtų išspręsti žaliavų stygiaus, vietinių atsinaujinančių išteklių pritaikymo, medžiagų perdirbimo ir aplinkosaugos problemas. Be to, pluoštinės kanapės – tai tarsi atsvara pasauliniam klimato atšilimui, kadangi 1 ha pluoštinių augalų vegetacijos laikotarpiu sugeria apie 2,5 t CO₂ (Spychalski 2014). Pluoštinių kanapių biomasės produktyvumas yra labai didelis, netgi 2–2,5 karto didesnis, nei gaunama iš tokio pat ploto miško (Kozłowski 2009).

Tačiau siekiant įgyvendinti tokius inovatyvius sprendimus aplinkos apsaugos ir statybos srityse – įdiegti energetiškai efektyvias termoizoliacines medžiagas ir gaminius statybos pramonėje – būtini moksliniai tyrimai. Tam, kad būtų gauta termoizoliacinė medžiaga karkasinių pastatų atitvarinėms konstrukcijoms įrengti, reikia ištirti kanapių pluoštą ir pluoštinį rišiklį – PLA, kuris biotechnologiniu būdu yra gaminamas iš augalinės kilmės produktų – kukurūzų. Tai yra alternatyva biologiškai neskaidiems sintetiniams pluoštams.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas yra natūralūs pluoštai (kanapių, linų, durpių); termoizoliacinis kompozitas iš kanapių pluošto ir durpių pluošto rišiklio; termoizoliacinis kompozitas iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio bei kompozito savybes gerinančių priedų – antipirenų ir hidrofobizatorių.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas yra sukurti pluoštinį termoizoliacinį kompozitą, jo gamybai parenkant tinkamiausią augalinės kilmės pluoštą, pluoštinį rišiklį ir priedus, didinančius gaminio atsparumą vandens ir ugnies poveikiui.

Darbo uždaviniai

Kad būtų pasiektas darbo tikslas, reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti mechaninio apdorojimo (smulkinimo, malimo, šukavimo) poveikį natūralių pluoštų (kanapių, linų ir durpių) fizikinėms savybėms.
2. Parinkti tinkamiausią pluoštų mechaninį apdorojimo būdą ir natūralų pluoštą termoizoliacinio kompozito sukūrimui.
3. Parinkti tinkamiausią rišiklį ir jo kiekį kompozito gamybai.
4. Nustatyti kompozito iš pluoštinių augalų struktūros formavimo poveikį fizikinėms ir mechaninėms savybėms.
5. Ištirti hidrofobinių ir antipireninių priedų poveikį medžiagų įmirkiui ir degumui.

Tyrimų metodika

Natūralių pluoštų ir jų kompozitų tyrimams taikyti šie metodai: šilumos laidumo koeficiento, trumpalaikės vandens sugerties, pralaidumo vandens garams, garso sugerties koeficiento, gniuždomojo įtempio, tempimo stiprio nustatymai, degumo tyrimai.

Eksperimentiniams duomenims apdoroti ir jų patikimumui įvertinti buvo taikyti matematiniai ir statistiniai metodai.

Struktūros tyrimams taikyti optinės ir elektroninės skenavimo mikroskopijos analizės metodai.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatytas skirtingų mechaninių apdorojimo metodų (smulkinimo, malimo, šukavimo) poveikis pluoštinių medžiagų šilumos laidumui.

Naudoti natūralių pluoštų mechaniniai apdorojimo metodų būdai leidžia suformuoti ir parinkti tinkamą makro- ir mikrostruktūrą, lemiančią mažą šilumos laidumo koeficientą.

2. Nustatyti racionalūs kanapių pluošto parametrai, leidžiantys suformuoti optimalios makro- ir mikrostruktūros kompozitą, užtikrinantys tolygų sumaišymą su PLA rišikliu. Reguluojant pluoštų apdorojimą ir jų išeigą, gauti smulkinti 2–3 cm ilgio kanapių pluoštai, kurie tinkami efektyvaus termoizoliacinio kompozito gamybai.
3. Nustatytos termoizoliacinio kompozito iš augalinės kilmės pluoštų ir PLA rišiklio, naudojant karšimo technologiją, fizikinės ir mechaninės savybės. Karšimo metodas neaustinių medžiagų technologijos linijoje leidžia suformuoti efektyvią termoizoliacinę medžiagą.
4. Nustatytas hidrofobinių ir antipireninių priedų poveikis termoizoliacinio kompozito iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio vandens sugerčiai ir degumui. Natūralių pluoštų hidrofobinimui ir degumo slopinimui gali būti naudojami tekstilės pramonei pritaikyti hidrofobizatoriai ir antipirenai. Tinkamas priedų tirpalų koncentracijos parinkimas leidžia sumažinti termoizoliacinio kompozito vandens sugertį ir degumą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas termoizoliacinis kompozitas iš kanapių pluošto ir rišiklio – PLA – gali būti gaminamas neaustinių medžiagų technologijos linijoje. Sukurtas efektyvus termoizoliacinis kompozitas gali būti naudojamas pastatų atitvarų karkasinėms konstrukcijoms ir toms konstrukcijoms, kurių neveikia apkrova, apšiltinti bei garsui sugerti.

Ginamieji teiginiai

1. Mechaninis augalinio pluošto (kanapių, linų, durpių) apdorojimas (smulkinimas, malimas, šukavimas) leidžia reguliuoti šilumos izoliacijai naudojamų žaliavų makro- ir mikrostruktūrą bei fizikines savybes.
2. Formavimo sudėties ir priedų parinkimas leidžia reguliuoti augalinės kilmės pluoštų pagrindu sukurto termoizoliacinio kompozito fizikines ir mechanines savybes.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbti keturi straipsniai: vienas – mokslo žurnale įtraukta-me į Thomson Reuters Web of Science leidinių sąrašą, turinčiame citavimo indeksą (Stapulionienė *et al.* 2015), du – tarptautinės duomenų bazės mokslo žurnaluose (Stapulionienė *et al.* 2016; Vaitkus *et al.* 2014), vienas – recenzuojamoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos medžiagoje (Karpavičiūtė (Stapulionienė) 2013).

Disertacijoje pateiktų atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 5-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Fizinių ir technologinių mokslų tarpdalykiniai tyrimai“, vykusioje Lietuvos mokslų akademijoje, Vilniuje 2015 m.
- Vilniaus aplinkos apsaugos forumo – „Mūsų miesto aplinka – mūsų pasaulis, orumas, ateitis“, įvykusiame Vilniaus miesto savivaldybėje 2015 m.
- 17-oje Lietuvos mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, Aplinkos apsaugos inžinerija, įvykusioje Vilniuje 2014 m.
- 22-oje tarptautinėje konferencijoje „Baltic Conference of Engineering Materials & Tribology“, įvykusioje Rygoje 2013 m.
- 16-oje Lietuvos mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusioje Vilniuje 2013 m.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados ir du priedai.

Darbo apimtis (be priedų) yra 125 puslapiai, tekste pateiktos 37 numeruotos formulės, yra 45 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 144 literatūros šaltiniai.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju UAB „Neaustima“ direktoriui Raimondui Lukauskui, vyriausiajai technologei Virginijai Savickienei ir įmonės kolektyvui už pagalbą gaminant termoizoliacinį kompozitą iš kanapių pluošto.

Medžiagų iš pluoštinių augalų panaudojimo termoizoliacinių kompozitų gamyboje apžvalga

Skyriuje analizuojamas natūralių pluoštų klasifikavimas, pluoštų struktūros ypatumai, cheminė sudėtis, pluošto atskyrimo būdai, apžvelgiami kitų užsienio autorių natūralių pluoštų pagrindu sukurtų biriųjų šilumos izoliavimo medžiagų tyrimai. Analizuojamos kompozitų iš natūralių pluoštų su įvairiais rišikliais fizikinės ir mechaninės savybės.

Skyriaus tematika paskelbti 4 autorės straipsniai (Stapulionienė 2013; Vaitkus *et al.* 2013; Stapulionienė *et al.* 2015; Stapulionienė *et al.* 2016).

1.1. Pluoštų klasifikavimas

Žinoma įvairiausių rūšių pluoštų. Jie paprastai klasifikuojami pagal kilmę (gavimo būdą), elementinę sudėtį, savybes, paskirtį. Atsižvelgiant į kilmę, pluoštai skirstomi į natūralius ir cheminius (1.1 lentelė). Ir vienus, ir kitus sudaro organinės arba neorganinės kilmės medžiagos. Cheminiai organiniai pluoštai dar skirstomi į dirbtinius ir sintetinius. Dirbtiniai – tai cheminiai pluoštai, sudaryti iš chemiškai apdorotų gamtinių polimerų. Sintetiniai pluoštai – cheminiai pluoštai,

sudaryti iš vieno ar daugiau sintetinių polimerų. Pagal paskirtį skiriami namų ir techniniai pluoštai. Iš pirmųjų gaminama namų tekstilė: audiniai, mezginiai, ne-austinės medžiagos, skirti naudoti namų ūkyje. Techniniai pluoštai – cheminiai ypatingų savybių pluoštai – naudojami labai įvairiems techniniams gaminiams: lynams ir virvėms, žvejybos ir apsauginiams tinklams, filtrams, kompozitams ir t. t. (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Blackburn 2005).

Natūralūs organiniai pluoštai gali būti augalinės ir gyvūninės kilmės. Augalinių pluoštų pagrindas – celiuliozė. Šie pluoštai gali būti atskiriami nuo sėklų (medvilnės, kapoko), jie gaminami iš stiebų (linų, kanapių, džiuoto, kenafo, ramė), iš lapų (sizalio, abakos, heneko), iš vaisių (kokoso, ananaso) (Arib *et al.* 2004). Iš augalų stiebų ir lapų gaunami pluoštai paprastai vadinami karnienos (luobiniais) pluoštais (Blackburn 2005; Mažonienė, Bendoraitienė 2008). Šių pluoštų ilgis labiausiai priklauso nuo pluošto vietos pačiame augale. Pluoštai, gaunami iš vaisių ir sėklų, yra kelių centimetrų ilgio, o pluoštai, gaunami iš stiebų ir lapų, yra daug ilgesni (ilgesni negu 1 m) (Blackburn 2005). Gyvūniniai pluoštai yra baltyminiai ir gaunami iš įvairių gyvulių (avių, ožkų, kupranugarių, triušių ir kt.) plaukų arba iš šilkaverpių, kurių vikšrų liaukos gamina greitai kietėjančias ir gijas sudarančias išskyras (Mažonienė, Bendoraitienė 2008).

1.1 lentelė. Pluoštų klasifikacija pagal kilmę (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Arib *et al.* 2004; Blackburn 2005)

Table 1.1. Classification of fibres by origin (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Arib *et al.* 2004; Blackburn 2005)

PLUOŠTAI					
Natūralūs					
Organiniai					Neorganiniai
Augaliniai				Gyvūniniai	Mineraliniai
Sėklų	Stiebų	Lapų	Vaisių	Vilna Gamtinis Šilkas	Asbestos
Medvilnė Kapokas	Linai Kana­pės Džiutas Ramė Dilgėlė Kenafas	Sizalis Abaka	Kokosas Ananasas		
Cheminiai					
Organiniai				Neorganiniai	
Dirbtiniai		Sintetiniai			
Hidratceliulioziniai Acetilceliulioziniai Alginatiniai Kaučiukiniai Baltyminiai		Heterograndiniai Angliagrandininiai Anglies		Stiklo Metalas Keramikos	

Augalai, iš kurių yra gaunamas natūralusis pluoštas, atsižvelgiant į jų panaudojimą, dar skirstomi į pirminius ir antrinius augalus. Pirminiai augalai (džiutas, kanapės, kenafas, sizalis) auginami dėl gaunamo pluošto, naudojamo kompozitams. Pluoštas, gaunamas iš antrinių augalų (ananaso, kokoso), naudojamas šalutiniams produktams (virvėms, lynams, popieriui) gaminti (Staiger, Tucker 2008).

1.2. Gamtiniai karnienos pluoštai

Didžiausią dalį natūralių pluoštų sudaro karnienos pluoštai. Šie gamtinės kilmės pluoštai dėl savybių yra labai vertingi, todėl naudojami tekstilėje, automobilių, aviacijos ir baldų, popieriaus, kosmetikos ir maisto pramonėje. Per paskutiniuosius du dešimtmečius augalinės kilmės pluoštai naudojami ir statybos srityje kaip ekologiška, efektyvi šilumos izoliavimo medžiaga (Kicinska-Jakubowska *et al.* 2012).

Džiuto pluoštas pagal sunaudojamą kiekį yra antrasis po medvilnės natūralusis pluoštas. Džiutas – vienas pigiausių natūralių pluoštų (Faruk *et al.* 2012). Džiutas – tai vienmetis augalas, labai jautrus šalnoms. Jo stiebo aukštis yra 1,5–4,5 m, storis – 10–25 mm (Mažonienė, Bendoraitienė 2008). Džiutas yra ilgas, minkštas ir blizgus pluoštas (Mather, Wardman 2011).

Ramė pluoštas išskiriamas iš daugiamečio dilgėlinio augalo – ramė – stiebų. Jo stiebo aukštis – 1,5–3 m. Ramė pluoštui būdinga tai, kad techninis pluoštas nesudaro vientisų ryšulėlių, o susideda iš gana palaidų plaušelių. Jų ilgis yra 50–65 mm, o techninio pluošto – 60–160 mm. Ramė pluoštas yra stiprus, atsparus puvimui, labai blizga. Naudojamas audiniams, tinklams, vertybiniam popieriui gaminti (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Mather, Wardman 2011).

Kenafo pluoštas išgaunamas iš augalo *Hibiscus cannabinus*. Kenafo sudaro dviejų tipų pluoštai: ilgi ir trumpi pluoštų ryšuliai. Pluoštų ilgis varijuoja nuo 3 mm iki 7 mm, skersmuo yra 21 µm. Kenafo pluoštas yra šiurkštus, trapus, todėl labai sudėtinga jį apdoroti. Pluoštas naudojamas popieriui gaminti, tekstilėje, statybos pramonėje (Mohanty *et al.* 2005).

Sizalio pluoštas išgaunamas iš šviežių augalo *Agave sisalana* lapų. Sizalio pluošto ilgis varijuoja nuo 0,6 m iki 1,5 m, pluošto skersmuo – 100–300 µm. Pluoštas yra gana šiurkštus ir nelankstus (Mohanty *et al.* 2005).

Manila, dar vadinama abaka, – tai pluoštas, išskiriamas iš pluoštinio banano laparnakščių. Pluoštinis bananas, primenantis valgomąjį bananą, – tai amžinai žaliuojantis daugiamecis augalas. Techninis pluoštas yra nuo 2 iki 4 m ilgio. Abakos pluoštas – vienas stipriausių natūralių pluoštų. Manila – lengvas, stiprus, labai atsparus drėgmei ir vandeniui pluoštas, todėl tai puiki žaliava jūrų lynams sukurti (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Blackburn 2005).

Iš atsinaujinančių išteklių (gamtinių karnienos pluoštų), kurie gali būti naudojami termoizoliacinėms medžiagoms gaminti, daugiausia dėmesio sulaukia pluoštinės kanapės ir linai. Jų pluoštas yra vienas iš plačiausiai naudojamų biologinių pluoštų (Kymäläinen, Sjöberg 2008). Linai ir kanapės – vienmečiai augalai.

Pluoštinės kanapės (*Canabis sativa L.*) yra viena iš seniausiai auginamų žemės ūkio kultūrų. Pluoštinės kanapės yra augalas, lengvai prisitaikantis prie naujų augimo sąlygų ir pasižymintis didele rūšių įvairove. Pluoštinės kanapės turi 50–500 cm aukščio ir 4–20 mm skersmens stiebelį (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Berger 1969). Pasaulinėje rinkoje kanapės naudojamos daugiau kaip 25 000 produktų gamyboje devyniose subrinkose: tai žemės ūkio, tekstilės, antirinio perdirbimo, automobilių, baldų, maisto / gėrimų, asmeninės priežiūros produktų, popieriaus, statybinių medžiagų pramonė (Weightman, Kindred 2005; Johnson 2013; Small 2002).

Pluoštiniai linai – vienmečiai žoliniai augalai. Pluoštiniai linai turi 60–120 cm aukščio ir 0,8–2,0 mm skersmens stiebelį su mažais lapeliais. Pumpurų krovimo metu linų stiebelis intensyviai auga, jame smarkiai daugėja plaukelių. Plaukeliai pradeda bręsti ir jungtis į ryšulėlius (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Berger 1969).

1.3. Natūralių pluoštų (linų, kanapių) cheminė sudėtis ir struktūra

Augalo rūšis, kilmė, kokybės ir aplinkos sąlygos lemia natūralių pluoštų cheminę sudėtį ir struktūrą (Blackburn 2005; Faruk *et al.* 2012).

Įvairiuose literatūros šaltiniuose linų ir kanapių pluošto cheminė sudėtis nurodoma skirtinga (1.2 lentelė). Tai lemia skirtingos linų ir kanapių rūšys, nevienodos augimo sąlygos.

Pluoštas pasižymi dideliu heterogeniškumu, jį sudaro trys pagrindinės dalys: celiuliozė, hemiceliuliozė ir ligninas, kurios nurodo fizines pluošto savybes. Celiuliozė yra tvirčiausia ir stipriausia pluošto organinė sudedamoji dalis, suteikianti ląstelių sienelėms stiprumo. Hemiceliuliozės, jungiančios celiuliozę ir ligniną, yra visame pluošte. Ligninas padidina ląstelių sienelių stiprumą ir standumą, sumažina vandens pralaidumą ir stabdo cheminę, fizinę ir mikrobiologinę degradaciją (Yan *et al.* 2014).

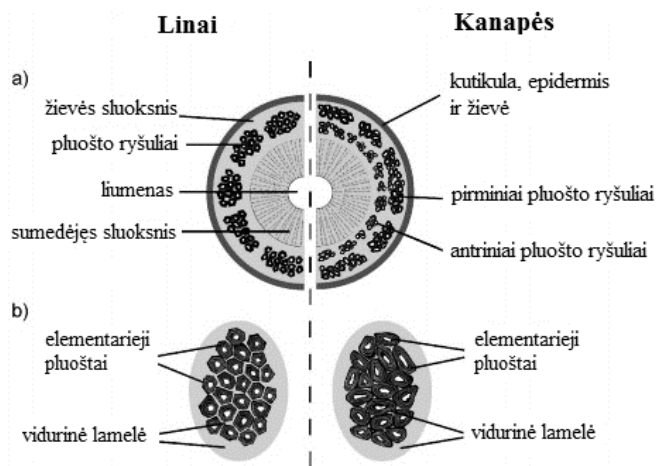
Kanapių ir linų stiebus sudaro du skirtingi komponentai: žievė, kuri susideda iš pluošto ryšulėlių, ir šerdis, susidedanti iš medienos ląstelių (1.1 a pav.) (Ranalli 1999). Stiebo išorė, padengta žieve, vadinama epidermiu. Pluošto ryšulėliai, kurie surišami vidurinėje lamelėje (1.1 b pav.), ir sumedėjusi šerdis (spalviai) yra stiebo viduje. Augalui subrendus, centre susidaro tuščiaviduris kanalas.

Kiekvienas pluošto ryšulėlis susideda iš pavienių plaušelių, susiklijavusių pektiniais ir kitomis medžiagomis. Pluoštų ryšuliai yra dviejų tipų: pirminiai (5–55 mm ilgio) ir antriniai (trumpi) (Pallensen 1996).

1.2 lentelė. Karnienos pluoštų parametrai ir cheminė sudėtis

Table 1.2. Parameters and chemical content of bast fibres

Augalo rūšis	Pluošto parametrai		Pluoštų cheminė sudėtis					Šaltinis
	Pluoštų ilgis, mm	Pluoštų skersmuo, μ m	Celuliozė, %	Hemiceliuliozė, %	Ligninas, %	Pektinai, %	Riebalai, pelenai ir vaškas, %	
Kanapės	15–55	17–22,8	70–92	18–22	3–5	1–2	1–2	Kymäläinen <i>et al.</i> 2004; Thomsen <i>et al.</i> 2005; Jankauskienė <i>et al.</i> 2007
Linai	9–70	5–38	60–81	14–19	2–3	1–2	1–2	



1.1 pav. Linų ir kanapių stiebų struktūra:

a) stiebo skerspjūvis; b) pluoštų ryšulėliai (Nytker 2006)

Fig. 1.1. Structures of flax and hemp stems:

a) cross-section of stems, b) fibres bundles (Nytker 2006)

Gamtinių pluoštų plaukelių morfologinė sandara gali būti skirtinga net išilgai jų. Pluošto mikrostruktūra (skerspjūvio forma ir paviršiaus ypatumai) labai priklauso nuo pluošto gavimo būdo ir sąlygų (Mažonienė, Bendoraitienė 2008).

Morfologinė pluoštų struktūra ir cheminė sudėtis turi didelę įtaką šilumos laidumui. Natūralūs pluoštai lengvai perdirbami, biologiškai skaidūs, pasižymi akyta struktūra, mažu skersmeniu ir mažu tankiu, kurie lemia geras šilumines savybes (Kymäläinen 2004).

Pluoštinių medžiagų šilumos laidumas priklauso nuo plaušelių išsidėstymo gaminio struktūroje. Kuo mažesnis plaušelio storis ir porų dydis, tuo geriau izoliuojama šiluma (Gailius *et al.* 2010). Struktūriškai pluoštus galima apibūdinti kaip erdvinę sistemą, kuri sudaryta iš daugybės tam tikra tvarka išsidėsčiusių vienas kito atžvilgiu ir tarpusavyje susipynusių plaušų (Kaminskas 2002).

1.4. Pluošto atskyrimas

Augalinį pluoštą nuo sumedėjusio sluoksnio atskirti galima įvairiais būdais: cheminiu, fiziniu ir cheminiu, terminiu (vandens garais), mechaniniu (dekortikacija), biocheminiu, biologiniu (mirkant vandenyje ir klojėjant lauke) (Stankovic *et al.* 2007; Thomsen *et al.* 2005). Augalų stiebų klojėjimas – dažniausiai naudojamas augalų pluošto dalinis atskyrimo būdas. Klojėjimosi metu mikroorganizmai suardo ligninus ir pektinus, kurie riša medieną (spalius) ir pluoštą (Pallesen 1996). Yra du augalų stiebų klojėjimosi būdai:

- Klojėjimas lauke, kai augalų stiebai paliekami, tačiau yra nuolat stebimi, siekiant užtikrinti, kad karnienos pluoštas gerai atsiskirtų nuo šerdies (Tahir *et al.* 2011).
- Mirkymas vandenyje, kai augalų stiebai laikomi tvenkiniuose arba rezervuaruose ir lėtai tekančiose upėse. Šis procesas labai brangus, kadangi stiebams mirkyti reikia daug švaraus vandens, tačiau taikant šį klojėjimosi būdą gaunamas aukštos kokybės pluoštas (Mwaikambo 2006).

Augalų stiebelių klojėjimas laukuose Europoje yra populiariausias būdas, nors šis klojėjimosi procesas užtrunka kelias savaites (Hobson *et al.* 2001) arba net keletą mėnesių, kai stiebai paliekami klojėtis per visą žiemą (Kymäläinen *et al.* 2001) ir labai priklauso nuo aplinkos sąlygų (Tahir *et al.* 2011). Tačiau stiebų klojėjimas palengvina augalinio pluošto atskyrimą nuo medžio vėliau – apdorojant stiebus mechanškai (dekortikuojant). Klojėtas pluoštas yra minkštas, elastingas, pilkai sidabrinio atspalvio, gerai skaidosi ir pasižymi geromis technologinėmis savybėmis (Savickis 1988). Klojėjimosi procesas lemia pluoštų spalvą ir cheminę sudėtį (Pallesen 1996; Hobson *et al.* 2001; Jankauskienė *et al.* 2015). Anthony (2005) ir Hobson *et al.* (2001) teigia, kad natūraliai klojėto augalinio pluošto spalvos svyruoja nuo juodos iki pilkos spalvų pagal grybelių ir bakterijų

kiekį, kai augalų stiebai klojėja, o neklojėtų, rudenį nuimtų, augalinių stiebų spalva būna šviesiai žalsva. Pasak Savickio (1988), pluošto spalva daug pasako apie jo kokybę. Šviesiai pilkos ir šviesiai geltonos spalvos pluoštas yra gaunamas iš gerai išsivysčiusių, kokybiškai paruoštų augalo šiaudelių. Tamsiai pilka ir ruda spalva rodo, kad pluoštas gautas iš augalų, pažeistų ligos, arba blogai apdorotų gamybos metu – dėl to jis būna silpnas.

Pluoštas nuo sumedėjusio sluoksnio sunkiau atskiriamas, stiebus nuimant rudenį ir jų neklojėnant dėl pluošto tiesumo ir standumo (Kymäläinen 2004). Tačiau Hobson *et al.* (2001) teigia, kad dekortikuojant (pirminis augalų šiaudelių apdorojimo procesas) neklojėtus augalų stiebus išgaunama ne mažesnė pluošto išeiga negu iš klojėtų augalų stiebų. O pluošto kiekis stiebuose priklauso nuo augalo veislės, dirvožemio, tręšimo, nuėmimo laiko, taip pat nuo stiebo storio ir šakotumo (Jankauskienė *et al.* 2007). Atskirtas pluoštas iš neklojėtų ir klojėtų stiebų yra tokio pat stiprumo ir ilgio, tačiau neklojėtas pluoštas yra šiek tiek šiurkštesnis ir stambesnis negu klojėtas pluoštas. Atskiriant pluoštą iš neklojėtų augalų stiebų, gaunamas šiek tiek didesnis spalių kiekis negu iš klojėtų, o atliekų (dulkių) būna net dvigubai daugiau.

Mokslininkai Bennett *et al.* (2006) nurodo, kad iš 10 t/ha sausų kanapių stiebų (kanapių veislė „Futura“) gaunama apie 4,3 t/ha pluošto, iš „Fedora“ – 4,6 t/ha pluošto, o iš „Beniko“ – 5,8 t/ha pluošto. Mankowski *et al.* (2015), tyrę sausų pluoštinių linų šiaudelių derlių, nustatė, kad iš 7,6 t/ha sausų linų stiebų gaunama 1,26 t/ha gryno pluošto. Jankauskienė *et al.* (2007) teigia, kad klojėtų ir neklojėtų (abiems atvejais ruluotų) kanapių bei linų pluošto išeiga siekia 26 %. Jankauskienė ir Bačelis (2009), tyrę įvairias linų veisles, nustatė, kad linai gali užauginti net iki 6,30 t/ha stiebelių, kurie gali būti perdirbti į 1,65 t/ha ilgojo pluošto. Plonuose stiebeliuose ir šiaudeliuose būna santykinai daugiau pluošto negu storuose, kadangi pastaruosiuose yra daugiau medienos. Todėl pluošto išeiga procentais gaunama mažesnė už plonastiebių šiaudelių (Mockapetris 1963). Taip pat buvo nustatyta, kad tankesniame pasėlyje brazdo ląstelės suformuoja daugiau pluoštinių ląstelių ir mažiau medienos, todėl iš tankiau pasėtų linų gaunama daugiau pluošto nei iš retesnių pasėlių (Balčiūnas, Jankauskienė 2008).

1.5. Medžiagų iš atsinaujinančių išteklių naudojimas šilumos izoliacijai

Skirtingose pasaulio šalyse dėl nevienodų klimato sąlygų ir vyraujančių tradicijų termoizoliacinėms medžiagoms gaminti naudojami įvairių rūšių augalai. Dažniausiai iš šių augalų mechaninio, cheminio ir kitokio apdorojimo metu gaunami pluoštai. Pluoštinių augalų naudojimas statybinių medžiagų gamybai atitinka

ekologiškų medžiagų pramonei keliamus reikalavimus. Natūralūs pluoštai iš medienos ir žemės ūkio kultūrinių augalų (linų, kanapių, šiaudų ir kt.), gyvūninės kilmės pluoštai yra atsinaujinantis ištekliai, kurie turi didelį potencialą kuriant „žaliuosius produktus“ ir gali pakeisti žalingus aplinkai produktus. Natūralūs pluoštai yra tinkami šilumos izoliavimo medžiagoms dėl šiluminių ir ekologinių savybių (Kymäläinen, Sjöberg 2008). Pluoštai gali būti naudojami storiems ir ploniems dembliams, minkštoms ir kietoms plokštėms bei birioms šilumos izoliavimo medžiagoms gaminti. Taip pat natūralūs pluoštai vis labiau yra taikomi kompozitams armuoti (Chandramohan, Marimuthu 2011).

Energetiškai efektyvioms termoizoliacinėms medžiagoms įdiegti statybos pramonėje būtini moksliniai tyrimai, leidžiantys sukurti norimų eksploatacinių charakteristikų medžiagas. Tyrimams mokslininkai pasirenka įvairius natūralius pluoštus. Užsienio autoriai (Ye *et al.* 2006; Monohar 2012) ištyrė avių vilnos ir palmių pluošto šiluminės charakteristikas. Jie nustatė, kad avių vilnos šilumos laidumo koeficientas kinta nuo 0,067 W/(m·K) iki 0,035 W/(m·K), kai tankis atitinkamai kinta nuo 9,60 kg/m³ iki 25,9 kg/m³; palmių pluošto, kaip ekologiškos birios šilumos izoliavimo medžiagos (pluošto ilgis – 30–100 mm), esant 20 °C, 25 °C ir 30 °C vidutinėms temperatūroms, šilumos laidumo koeficientas atitinkamai lygus 0,0555 W/(m·K), 0,0569 W/(m·K) ir 0,0578 W/(m·K).

Buvo nustatytos birių medžiagų iš kanapių ir linų pluošto šiluminės savybės ir įvertintas jų tinkamumas alternatyvioms šilumos izoliavimo medžiagoms gaminti (Freivalde, Kukle 2012). Birios termoizoliacinės medžiagos iš kanapių pluošto šilumos laidumo koeficiento vertės kito nuo 0,031 W/(m·K) iki 0,040 W/(m·K), tankiui kintant nuo 98,1 kg/m³ iki 116 kg/m³, palaidų linų pluošto šilumos laidumo koeficientas – nuo 0,045 W/(m·K) iki 0,035 W/(m·K), tankiui kintant nuo 20,0 kg/m³ iki 100 kg/m³ (Kymäläinen, Sjöberg 2008). Taip pat buvo nustatyti įvairių veislių („Purini“ ir „Bialobbrzeskie“) kanapių pluoštų šilumos laidumo koeficientai. „Purini“ kanapių pluoštų šilumos laidumo koeficientas kito nuo 0,031 W/(m·K) iki 0,040 W/(m·K), tankiui kintant nuo 98,1 kg/m³ iki 116,2 kg/m³, „Bialobbrzeskie“ kanapių pluošto šis koeficientas kito nuo 0,035 W/(m·K) iki 0,040 W/(m·K), esant tankio diapazonui 69,0–89,3 kg/m³ (Freivalde, Kukle 2012).

Gnip ir Keršulis (1998) nagrinėjo ekovatą kaip birią šilumos izoliavimo medžiagą. Jie nustatė, kad šilumos laidumo koeficientas kito nuo 0,0440 W/(m·K) iki 0,0455 W/(m·K), tankiui kintant nuo 35 kg/m³ iki 63 kg/m³. Taip pat buvo nustatyta ekovatos šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo drėgnio. Gauti rezultatai parodė, kad medžiagos šilumos laidumo koeficientas nuo drėgnio priklauso labiau negu nuo tankio. Vėjelis *et al.* (2015) ir Nicola-jsen (2005) nustatė, kad celiuliozės vatos įdrėkis padidina šilumos laidumo koeficientą.

Paskutinius du dešimtmečius natūralūs pluoštai termoizoliacinėms pluoštinėms medžiagoms gaminti naudojami pasitelkiant įvairius rišiklius. Užsienio mokslininkų (Korjenic *et al.* 2016) tirti skirtingų sudėčių kompozitai iš natūralių pluoštų (džiuto, linų, kanapių), spalių ir rišiklio – dvikomponenčio poliesterio, pasižymėjo tokiomis savybėmis: šilumos laidumo koeficientas kito nuo 0,0500 W/(m·K) iki 0,0399 W/(m·K), kai tankis buvo nuo 26,1 kg/m³ iki 95,5 kg/m³. Minėtieji užsienio autoriai taip pat įvertino drėgmės poveikį šių kompozitų iš natūralių pluoštų šiluminėms savybėms – šilumos laidumo koeficientas kito nuo 0,0393 W/(m·K) iki 0,0458 W/(m·K), kai drėgmės kiekis kito nuo 0 % iki 14 % (Korjenic *et al.* 2011). Taip pat buvo tirti kompozitai iš linų ir kanapių pluošto su rišamąja medžiaga poliesterio pluoštu, kurių storis buvo 50 mm, tankis 31,0–39,3 kg/m³, atitinkamas šilumos laidumo koeficientas – 0,0368–0,0419 W/(m·K) (Zach *et al.* 2011). Mokslininkų Takagi *et al.* (2007) tirta kompozito, pagaminto iš 60 % bambukų pluošto, naudojant 40 % rišamąją medžiagą – dervų pavidalo polipeno rūgštį, šilumos laidumo koeficientas priklausė nuo medžiagos tankio: didėjant tankiui, šis koeficientas taip pat didėjo. Kompozito iš bambuko pluošto, surišto epoksidine derva, šiluminės savybės tyrė ir mokslininkai Chandana ir Hussian (2013). Tačiau jie nubrėžė šilumos laidumo koeficiento priklausomybę nuo pluoštų frakcijų skirtingo apspaudimo – šilumos laidumo koeficientas mažėjo, didėjant pluoštų frakcijų apspaudimui. Pasak Zach *et al.* (2012), avių vilna taip pat pasižymi geromis šilumos izoliavimo savybėmis. Mokslininkai nustatė medžiagos šilumos laidumo koeficientą esant skirtingoms temperatūromis: 10 °C, 20 °C, 30 °C ir 40 °C. Gauti rezultatai parodė, kad didėjant temperatūrai, šilumos laidumo koeficientas taip pat didėja. Kintant temperatūrai nuo 10 °C iki 40 °C, šilumos laidumo koeficiento padidėjimo pokytis siekė 25 % ir 16 %, kai medžiagos tankis buvo atitinkamai 25 kg/m³ ir 40 kg/m³.

Durpių pluoštas dėl tinkamų šiluminių savybių taip pat apibūdinamas kaip šilumos izoliavimo medžiaga. Autoriai Širšinaitė ir Puodžiukynas (1995) nustatė plokštės iš durpių pluošto šilumos laidumo koeficientą, kuris kito nuo 0,055 W/(m·K) iki 0,085 W/(m·K). Termoizoliacinių medžiagų gamybai naudojamas ir durpių pluoštas, kuriam naudojamas 5 % kalkių priedas. Durpių pluoštas kaip biri termoizoliacinė medžiaga gali būti naudojama grindų ir sienų konstrukcijose (Berge 2009). Latvių mokslininkai tyrė kompozitą iš kanapių ir durpių pluošto. Jie nustatė, kad kompozito šilumos laidumo koeficientas kito nuo 0,056 W/(m·K) iki 0,060 W/(m·K), esant tankiui 240 kg/m³ (Korjajkins *et al.* 2013).

Šilumos izoliavimo medžiagoms yra naudojami trumpieji pluoštai: dembliams dažniausiai tinka mažesnio negu 15 cm ilgio pluoštai, birioms šilumos izoliavimo medžiagoms – 5–10 cm ilgio pluoštai (Kymäläinen 2004). Šilumos izoliavimo medžiagoms naudojamų pluoštinių augalų pluošto kokybę turi apibrėžti

tokios savybės: klijingumo laipsnis, drėgmės kiekis, spalvų ir dulkių kiekis, mikrobu koncentracija, pluošto ilgis (Kymäläinen *et al.* 2002).

1.6. Medžiagų iš atsinaujinančių išteklių naudojimas garso izoliacijai

Natūralūs pluoštai pasižymi geromis akustinėmis savybėmis, todėl medžiagos iš natūralių pluoštų, tokių kaip kenafas, linai, sizalis, kanapės, kamščiamedžio žievės, avių vilna, kokoso pluoštas, gali būti naudojamos atitvarinėse konstrukcijose kaip akustinė medžiaga (Asdrubali 2007).

Asdrubali (2007) nustatė 40 kg/m³ tankio kanapių pluošto garso sugerties koeficientą, kuris kito nuo 0,59 iki 0,52, dažniui kintant nuo 250 Hz iki 2000 Hz. Berardi ir Iannace (2015) parodė, kad natūralūs pluoštai turi labai gerą garso absorbciją, ypač vidutinių ir aukštųjų dažnių diapozone. Šie užsienio mokslininkai nustatė, kad kanapių pluošto bandinių (30 mm storio) garso sugerties koeficientas kito nuo 0,01 iki 0,70, kai dažnis atitinkamai kito nuo 125 Hz iki 2000 Hz; avių vilnos bandinių (40 mm ir 60 mm storio) kito 0,10–0,94 ir 0,15–0,94, dažniui kintant nuo 125 iki 2000 Hz. Zach *et al.* (2012) nustatė avių vilnos bandinių, kurių storis kito nuo 20 mm iki 60 mm, garso sugerties koeficientą, kuris kito nuo 0,55 iki 0,85, esant dažnio diapozonui 100–3150 Hz. Pasak Balagh (1996) ir Oldham *et al.* (2011), vilna dėl struktūros pasižymi geromis akustinėmis savybėmis, kadangi ji sudaryta iš labai mažų ertmių. Džiuto pluoštas geromis garso absorbcijos savybėmis neatsilieka nuo avių vilnos. Buvo nustatyta, kad džiuto pluošto garso sugerties koeficientas iš esmės yra 0,9 – kaip ir avių vilnos, kai dažnis didesnis nei 1000 Hz (Fatima, Mohanty 2011).

Kitų natūralių pluoštų – linų ir ramė – garso sugerties koeficientas, kai dažnis viršija 800 Hz, yra 0,8–0,6 (WeiDong, Yan 2012). Ismail *et al.* (2009) nustatė, kad palmių pluošto garso sugerties koeficientas yra didesnis negu kokoso pluošto. Palmių pluošto garso sugerties koeficientas varijuoja nuo 0,78 iki 0,97, dažniui kintant nuo 1000 Hz iki 5000 Hz. Kokoso pluošto garso sugerties koeficientas yra 0,77, kai dažnis – 2000–5000 Hz. Berardi ir Iannace (2015) taip pat nustatė, kad kokoso pluošto garso sugerties koeficientas yra panašus – 0,79, kai dažnis lygus 2000 Hz.

Natūralių pluoštų akustinės savybės labai priklauso nuo medžiagos tankio, storio, oro tarpų ir pluoštų išsidėstymo medžiagoje (Xiang *et al.* 2013; Hui, Fan 2009). Mokslininkai nustatė, kad garso sugerties koeficientas didėja, kai didėja medžiagos storis, tankis ir oro tarpų kiekis medžiagoje. Jei medžiagos yra didelės poros – trintis jose yra maža, o garso sugertis – nedidelė. Norint, kad medžiaga sugertų daugiau garso energijos, reikia siekti, kad sklisdama medžiagoje garso banga prarastų kuo daugiau energijos. Didėjant medžiagos storiui, didėja ir

trinties plotas, o kartu ir aerodinaminis pasipriešinimas. Garso sugerties koeficientas didžiausias vertes turi tada, kai, didėjant medžiagos storiui, aerodinaminis pasipriešinimas pasidaro toks didelis, kad garso bangos negali prasiskverbti į medžiagos gylį (Gužas *et al.* 2006). Jei sluoksnio storis yra per mažas, garso bangos tik atsispindės nuo standaus paviršiaus, o garso sugertis liks maža. Jei sluoksnio storis bus per didelis, krentanti garso banga praras energiją, nepasiekusi viso medžiagos storio ir standaus paviršiaus. Taigi tokia medžiaga bus per stora ir neekonomiška (Stauskis 2007).

Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir poliesterio rišiklio, $40,8 \text{ kg/m}^3$, $71,3 \text{ kg/m}^3$, $91,7 \text{ kg/m}^3$, $117,2 \text{ kg/m}^3$ tankio bandiniuose triukšmo mažinimo koeficientas (NRC) atitinkamai buvo lygus 0,35, 0,44, 0,51 ir 0,55 (Hui, Fan 2009). Tirtų kompozitų iš natūralių pluoštų – džiuoto, linų, kanapių – ir poliesterio rišiklio, kurių storis kito nuo 9,4 mm iki 81,2 mm, garso sugerties koeficientas varijavo nuo 0,15 iki 0,55. (Zach *et al.* 2010).

1.7. Natūralių pluoštų ir jų kompozitų degumo savybės

Atsparumo ugniai lygis – labai svarbi termoizoliacinių medžiagų iš natūralių pluoštų savybė. Natūralūs pluoštai pasižymi blogomis degumo savybėmis – mažai atsparūs ugniai, tačiau jų atsparumo laipsnis ugniai yra labai skirtingas. Tai priklauso nuo medžiagos prigimties, drėgnio, tankio, pluoštų įvairovės, elementarių pluoštų storio, jų cheminės sudėties ir pluoštų orientacijos medžiagoje (Manfredi *et al.* 2006; Kandola 2012). Kandola (2012) parodė, kad didelis celiuliozės kiekis natūralių pluoštų degumą didina, o didelis lignino kiekis – mažina. Tačiau didelis kiekis hemiceliuliozės medžiagos degumą padidina, kadangi hemiceliuliozės užsidegimo temperatūra ($150\text{--}280^\circ\text{C}$) yra žemesnė lyginant su celiuliozės ($200\text{--}240^\circ\text{C}$) ir lignino ($200\text{--}600^\circ\text{C}$) atitinkamomis temperatūromis (Oh *et al.* 2005).

Pagal liepsnos poveikį pluoštai skirstomi į tris grupes (Mažonienė, Bendoraitienė 2008):

- nedegūs – veikiami liepsnos neužsidega (asbesto, stiklo, metalo pluoštai);
- užsidegantys, bet pašalinus liepsną užgęstantys (vilna, poliamidiniai, poliesteriniai pluoštai);
- degūs – užsidega ir dega arba smilksta net ir pašalinus liepsną (medvilnės, linų, kanapių ir kt.).

Antipirenų poveikis remiasi įvairiais cheminiais junginiais, kuriuose yra fosforo, halogenų, silicio, nanometrinių dalelių ir mineralinių priedų (Mngomezulu *et al.* 2014). Plačiausiai naudojami halogenų ir fosforo pagrindu sukurti

antipirenai (Zaikov, Lomakin 2002). Kaip antipirenai taip pat gali būti naudojami: boro rūgštis, amonio sulfatai ir chloridai, amonio fosfatai ir boratai, cinko chloridas ir boratas, stibio oksidas, natrio boratas ir diciandiamidas (Grexa, Lübke 2001; Grexa *et al.* 2003; Lazko *et al.* 2013). Šie priedai apsaugo medžiagą nuo ugnies plitimo, ją sumažina ar sustabdo medžiagos degimą (Wichman 2003).

Natūralių pluoštų ir kompozitų iš natūralių pluoštų, apdorotų įvairiais antipirenais, degumo savybes tyrė daug mokslininkų. Lazko *et al.* (2013) tyrė medžiagų iš trumpų linų pluoštų degumo savybes. Siekdami pagerinti pluoštų atsparumą ugnies poveikiui, mokslininkai medžiagas apdorojo skirtingais antipirenais: 20 % aliuminio trihidroksidu (ATH), 20 % cinko boratu (ZB), 20 % melamino fosfatu (MMP), 20 % melamino boratu (MMB). Kai kuriems antipirenams įterpti į kompozitą buvo panaudotas žirnių baltymų rišiklis. Geriausi degumo rezultatai buvo gauti pluoštą apdorojus 20 % melamino boratu – liepsna iškart užgeso, kai tik buvo pašalintas liepsnos židiny.

Freivalde *et al.* (2014) tyrė neaustinių izoliacinių medžiagų iš kanapių pluošto degumo savybes. Mokslininkai aprašo neaustinių medžiagų, pagamintų trimis technologijomis – terminiu, adatiniu ir supinant pluošto klando plaukelius tūtomis sudaromu vandens srautu, – degumo rezultatus. Jie patvirtino kitų mokslininkų hipotezę, kad pluoštų dydis, lignino, celiuliozės, hemiceliuliozės kiekis pluoštuose ir medžiagos tankis lemia pluoštinių medžiagų degumą.

Sain *et al.* (2004) kompozitų iš pjuvenų, ryžių lukštų, surištų su polipropilenu, degumo savybėms pagerinti naudojo tokius antipirenus: magnio hidroksidą, boro rūgštį ir cinko boratą. Autoriai įrodė, kad magnio hidroksidas gali efektyviai sumažinti šių kompozitų degumą beveik 50 %.

Reti *et al.* (2009) atliko neaustinių medžiagų iš kanapių pluošto ir vilnos degumo tyrimus, kurie parodė, kad, esant tiek horizontaliam, tiek vertikaliam liepsnos plitimui, sudega visas bandinys. Į neaustinę medžiagą pridėjus polipieno rūgšties, liepsnos plitimas šiek tiek sumažėja, tačiau bandinys pradeda lydytis ir bandymo pabaigoje sudega. Mokslininkai, siekdami padidinti neaustinių medžiagų atsparumą ugniai, sugalvojo jas padengti tokių sudėčių išsiplečiančiais priedais: 1) polipieno rūgštis ir amonio polifosfatas (APP); 2) polipieno rūgštis, amonio polifosfatas (APP) ir anglies šaltinis (PER); 3) polipieno rūgštis, amonio polifosfatas (APP) ir ligninas (LIG); 4) polipieno rūgštis, amonio polifosfatas (APP), krakmolą ir polietilenglikolį (PEG). Šie priedai apsaugo bandinius nuo užsidegimo.

1.8. Natūralių pluoštų ir jų kompozitų drėgminės savybės

Natūralūs pluoštai pasižymi hidrofilinėmis savybėmis. Šie pluoštai hidrofiliški dėl dviejų pagrindinių priežasčių: pluoštų cheminės sudėties ir jų specifinės struktūros. Pluoštai, turintys polinių grupių, pasižymi didesniu hidrofiliskumu, taigi ir higroskopiskumu (Celino *et al.* 2014; Berthol 1998). Higroskopiskiausi yra PVA (polivinilo alkoholiniai), poliamidiniai (taip pat baltyminiai) ir celiulioziniai pluoštai. Natūralių pluoštų makromolekulės turi daugiau vandenį sorbuojančių grupių nei cheminių pluoštų makromolekulės (Mažonienė, Bendoraitienė 2008). Pasak Davies ir Bruce (1998), hemiceliuliozė, kuri sudaro didžiąją dalį amorfinės fazės augalo pluošte, atlieka drėgmės saugojimo funkciją. Šią hipotezę savo tyrimų rezultatais patvirtino Pejic *et al.* (2008), kurie teigė, kad hemiceliuliozės pašalinimas didina pluoštų drėgmės sorbciją, o lignino pašalinimas – mažina. Taip pat mokslininkai parodė, kad didelė pluoštų vandens sugertis pablogina medžiagos mechanines savybes. Dhakal *et al.* (2007) nagrinėjo poliesteriu surišto kompozito iš kanapių pluošto įmirkį vandenyje. Mokslininkai įrodė, kad dėl didelio kiekio celiuliozės medžiagos vandens sugertis didėja.

Daug užsienio mokslininkų nagrinėjo kompozitų iš natūralių pluoštų vandens sugertį pagal medžiagos masę. Assarar *et al.* (2011) tyrė kompozito iš linų pluošto, kurio rišamoji medžiaga yra epoksidinė derva, trumpalaikį įmirkį vandenyje. Atlikę tyrimus, mokslininkai nustatė, kad kompozito iš linų pluošto vandens sugertis pagal masę yra 13,5 %. O Le Duigou *et al.* (2009) analizavo kompozito iš linų pluošto, kurio rišiklis yra polipieno rūgštis, vandens sugertį, kai bandiniai panardinti jūros vandenyje. Rezultatai parodė, kad kompozito vandens sugertis pagal masę 20 °C temperatūroje yra 5,6 %. Kiti natūralių pluoštų vandens sugerties tyrimai parodė panašius rezultatus (Lee, Wang 2006; Chow *et al.* 2007; Alix *et al.* 2009).

Apdorojant natūralius pluoštus ir jų kompozitus cheminiu būdu, galima sumažinti šių medžiagų vandens sugertį. Pluoštų cheminis apdorojimas šarmais, silanais ir kt. iš dalies pakeičia pluoštų paviršiaus savybes. Cheminio apdorojimo būdu daugeliu atvejų galima pašalinti ligniną ir hemiceliuliozę, taip padidinant pluoštų stiprumą ir sumažinant vandens sugertį (Oladele *et al.* 2010; Saw *et al.* 2013). Oladele, Agbabiaka (2015) natūralių pluoštų kompozitus apdorojo natrio hidroksidu (NaOH) ir kalio hidroksidu (KOH). Tokiu cheminio apdorojimo būdu mokslininkai sumažino natūralių pluoštų vandens sugertį – kompozito, apdoroto natrio hidroksidu, vandens sugertis pagal masę buvo 2 %, kalio hidroksidu – 10 %. Ramadevi *et al.* (2012) natrio hidroksidu apdorojo abakos pluoštą. Autoriai apdorotus šarmu bandinius buvo įmerkę į jūros, tvenkinio, upės, gręžinio vandenį. Gauti rezultatai buvo panašūs į kitų pirmiau išvardytų užsienio mokslininkų gautus rezultatus. Borisova ir Reihmane (2013) kompozitą iš

medvilnės pluošto ir poliesterio rišiklio apdorojo įvairiais hidrofobizatoriais – Tubicoat HP 27, Rucostar DDD, Oleophobol ZSR – jų koncentracijos buvo keičiamos nuo 10 g/l iki 50 g/l. Mokslininkai teigė, kad didinant hidrofobizatorių koncentraciją, didėjo kompozito atsparumas vandens sugėrimui. Jie nustatė, kad efektyviausi hidrofobizatoriai yra Tubicoat HP 27 ir Rucostar DDD – su šiais priedais kompozitai tapo hidrofobiški. Zach *et al.* (2013) kompozitą iš kanapių pluošto su rišamąja medžiaga – poliesteriu – apdorojo hidrofobizatoriais purškimo būdu. Mokslininkai naudojo silano pagrindu pagamintus hidrofobizatorius: Lukofob 39, Draxil 153, Tagal. Buvo nustatyta apdorotų bandinių iš natūralių pluoštų trumpalaikė vandens sugėrimas, kai bandiniai iš dalies panardinti vandenyje. Geriausi rezultatai buvo gauti bandinius apdorojus hidrofobizatoriumi Tagal, kuris naudojamas ir tekstilės pramonėje, – vandens sugėrimas (W_p) yra 0,36 kg/m².

Latif *et al.* (2014) nustatė kompozitų, sudarytų iš kanapių pluoštų ir poliesterio rišamosios medžiagos bei įvairių priedų, vandens garų varžos faktorių. Bandymai buvo atlikti esant skirtingoms klimatinėms sąlygoms – 0/50 (0 % santykinis drėgnis viduje, 50 % – išorėje) ir 50/93 (50 % santykinis drėgnis viduje, 93 % – išorėje). Gauti rezultatai parodė, kad drėgnomis sąlygomis vandens garų varžos faktorius μ kito nuo 0,51 iki 1,85, o sausomis sąlygomis – nuo 1,57 iki 2,74 pagal kompozito sudėtį. Kompozitų iš linų, kanapių ir džiuoto pluošto, kurio rišamoji medžiaga buvo poliesteris, vandens garų varžos faktorius μ kito nuo 2,1 iki 5,3. Bandymų sąlygos nebuvo nurodytos (Korjenic *et al.* 2016). Kenafo pluošto vandens garų varžos faktorius buvo 1,2–2,3; avių vilnos – 1,0–3,0 (Asdrubali *et al.* 2015).

1.9. Kompozitų iš natūralių pluoštų stiprumo rodikliai

Kompozitų, sudarytų iš natūralių pluoštų ir rišamųjų medžiagų, mechaninės savybės priklauso nuo pluoštų ir rišiklio sukibimo tarpusavyje, pluoštų kiekio medžiagoje, pluoštų higroskopinių savybių (Shahzad 2011; Ahmad *et al.* 2006). Šie kompozitai pasižymi dideliu tempimo stipriu dėl gerų natūralių pluoštų mechaninių savybių (1.3 lentelė) (Malkapuram *et al.* 2008; Holbery, Houston 2006).

Pickering *et al.* (2007) parodė, kad pakeitus pluoštų cheminę sudėtį (pašalinus ligniną, hemiceliuliozę ir pektiną), galima pagerinti natūralių pluoštų stiprumines savybes. Taip pat įvairių pluoštų paviršiaus apdorojimas sustiprina natūralių pluoštų ir rišamosios medžiagos paviršiaus sąlyčio sukibimą, kuris pagerina medžiagos mechanines savybes (Shahzad 2011; Adekunle 2015).

Buvo tirti kompozitų iš kanapių, ramė, linų pluošto, neapdoroto ir apdoroto natrio hidroksidu (NaOH) ir polilaktido, mechaniniai rodikliai (Yu *et al.* 2010; Hu, Lim 2007; Bax, Müssig 2008). Atlikę tyrimus, mokslininkai nustatė, kad kompozito iš neapdorotų ramė pluoštų tempimo stipris yra 52,5 MPa, kompozito

iš apdorotų NaOH ramė pluoštų – 66,8 MPa, kompozito iš apdorotų NaOH kanapių pluoštų – 54,6 MPa, kompozito iš linų pluošto – 54,1 MPa. Taip pat buvo tirtos kompozito iš kanapių pluošto ir polipropileno mechaninės savybės (Etaati *et al.* 2014; Saleem *et al.* 2008). Gauti rezultatai parodė, kad kompozito iš kanapių pluošto su polipropilenu tempimo stipris yra 29,3–33,6 MPa, tačiau kompozito iš kanapių pluošto, apdoroto 5 % maleino rūgšties anhidridu (MAPP), tempimo stipris siekė net iki 40,8 MPa, o apdoroto pektinaze ir 2 % (MAPP) – 47,6 MPa. Plackett *et al.* (2003) nustatė laminavimo būdu pagaminto kompozito iš džiuo ir PLA tempimo stiprį – 100,5 MPa.

1.3 lentelė. Natūralių pluoštų tempimo stiprio duomenys

Table 1.3. Data of tensile strength of natural fibres

Pluoštai	Tankis, g/cm ³	Tempimo stipris, MPa	Šaltinis
Kanapės	1,47	310–750	Saheb, Jog 1999; Kozlowski 2000; Gassan <i>et al.</i> 2001.
Linai	1,50	345–1500	Saheb, Jog 1999; Mohanty <i>et al.</i> 2001; Gassan <i>et al.</i> 2001.
Džiutas	1,30	200–773	Wambua <i>et al.</i> 2003; Gassan <i>et al.</i> 2001.
Kenafas	1,45	295–1191	Saheb, Jog 1999; Mohanty <i>et al.</i> 2001; Gassan <i>et al.</i> 2001.
Ramė	–	400–938	Holbery, Houston 2006.
Sizalis	1,5	511–635	Holbery, Houston 2006.

Oksman *et al.* (2003) palygino kompozitų iš linų ir polilaktido (PLA) bei linų pluošto ir polipropileno (PP), mechaninių savybių rezultatus. Preliminarūs rezultatai parodė, kad kompozitų su PLA rišikliu mechaninės savybės yra 50 % geresnės negu kompozito su PP rišikliu, kuris naudojamas automobilių skydams gaminti.

1.10. Natūralių pluoštų kompozitų rišikliai

Kompozitams iš natūralių pluoštų formuoti gali būti naudojami tokie rišikliai:

- Termoplastikai. Su natūraliais pluoštais tinkami naudoti tokie termoplastikai, kurių apdorojimo temperatūra neviršija 230 °C, – tai polietilenas, polipropilenas (PP), polivinilchloridas (PVC). Kiti termoplastikai: po-

liamidai, polikarbonatai, kurių apdorojimo temperatūra yra didesnė negu 250 °C, negali būti naudojami su natūraliais pluoštais dėl irimo (Shahzad 2011; Malkapuram *et al.* 2008).

- Reaktoplastikai. Kompozitams formuoti su natūraliais pluoštais plačiausiai naudojami reaktoplastai yra poliesteris, epoksidinė derva, vinilo esteris, fenolio dervos. Poliesteris plačiausiai naudojamas reaktoplastikas natūralių pluoštų kompozitams (Shahzad 2011; Malkapuram *et al.* 2008).
- Biologiškai skaidūs polimerai. Tai termoplastinis krakmolai, polilaktidas, ligninas epoksidinės dervos pagrindu, sojos dervos pagrindu, epoksidinti sėmenys ir sojų aliejus. Polimerai yra pagaminti iš natūralių žaliavų, tačiau jie visi yra nevienodai biologiškai skaidūs. Jie gali būti visiškai skaidūs ir iš dalies skaidūs, nes iš esmės bioskaidumas priklauso nuo polimerų cheminės sudėties (Shahzad 2011; Mohanty *et al.* 2005).

Polilaktido pluoštas kelia didelį susidomėjimą, kadangi yra viena iš inovatyviausių medžiagų, plačiai taikomų įvairiose srityse. Šis polimeras yra termoplastiškas ir biologiškai skaidomas (Gupta *et al.* 2007). Polilaktidas yra vienas iš perspektyviausių biologiškai skaidžių polimerų dėl mechaninių, termoplastinių apdorojimo būdų ir biologinių savybių, tokių kaip biologinis suderinamumas, biologinis skaidumas (Schamack *et al.* 1999; Kalb, Pennings 1980).

Polilaktidai sudaryti iš besikartojančių (O-CO-CHR)-n, kur R=CH₃, grupių Polipieno rūgšties sintezė vykdoma iš kukurūzų ar kviečių krakmolo. Krakmolai hidrolizuojamas iki gliukozės, iš kurios fermentacijos būdu gaunamas natrio laktatas, o iš jo gryninimo ir elektrolizės būdu – laktido rūgštis. Laktido rūgštis yra polimerizuojama iki dilaktido, o pastarąjį polimerizuojant gaunamas polilaktidas, iš kurio gaminami įvairūs galimi produktai – plėvelės, pluoštai, dangos, plastmasės. Visi procesai yra grįžtami (Lunt, Shafer 2000; Mang 2000).

Polilaktidą pirmą kartą susintetino W. H. Carothers 1932 m. (Lunt, Shafer 2000). Tačiau masinė polilaktido gamyba pradėta tik 2003 metais. Tai vienintelis biologiškai skaidus sintetinis pluoštas, gaminamas pramoniniu būdu iš atsinaujinančių gamtinių išteklių, o ne iš naftos produktų (Mažonienė, Bendoraitienė 2008).

PLA yra suformuotas iš linijinių makromolekulių, kurių grandinėje ne mažiau kaip 85 % (masės) sudaro pieno rūgšties esterio segmentai, gauti iš natūraliai esančių cukrų. Jo lydymosi temperatūra yra ne mažesnė kaip 130 °C (Sedush 2015).

Šis pluoštas (1.4 lentelė) yra poliesterio pakaitalas, tik ne toks degus – jis yra savaime užgesantis, pasižymi hidrofilinėmis savybėmis, elastingas, atsparus UV spinduliams ir chlorui (Mažonienė, Bendoraitienė 2008; Blackburn 2005; Lunt, Shafer 2000).

Paveiktas karšto oro srauto, PLA plaušas suminkštėja iki tokio lygio, kad gali susilydyti vienas su kitu arba su kitomis medžiagomis. Tokie pluoštai tinka ne tik neaustinių medžiagų, bet ir termoizoliacinių medžiagų gamybai kaip rišiklis.

1.4 lentelė. Polilaktido pluošto savybės

Table 1.4. Properties of polylactide fibres

Parametrai	PLA	Šaltinis
Tankis, g/cm ³	1,25	Blackburn 2005
Lydymosi temperatūra, °C	160–170	Blackburn 2005
Stiklėjimo temperatūra, °C	55–60	Blackburn 2005
Drėgmės kiekis, %	0,4–0,6	Blackburn 2005
Tempimo stipris, MPa	100–350	Cicero, Dorgan 2002
Degumas	Vidutinis smilkimas, tirpsta	Reti <i>et al.</i> 2009; Blackburn 2005

Taip pat formuojant kompozitą iš natūralių pluoštų gali būti naudojamas rišiklis – durpių pluoštas (Toropovs *et al.* 2012). Durpės – organinės kilmės degioji medžiaga, susidariusi iš celiuliozinių augmenijos irimo produktų, ne visai suskilusių tokioje aplinkoje, kur nėra per daug drėgmės ir per mažai oro (Jinming, Xuehui 2009).

Būna žemapelkių, tarpinių pelkių ir aukštapelkių durpės. Žemapelkėse vyrauja daugiausia vilksvos, asiūkliai, nendrės, o aukštapelkėse – kimininės (baltosios) samanės, švyčiai, gailiai, viržiai, spanguolės. Tarpinėse pelkėse yra aukštapelkėse ir žemapelkėse augančių augalų (Sujetovienė 2012). Durpių susiskaidymo laipsnis priklauso nuo to, kokioje aplinkoje yra susiformavusios durpės, parodo jose esančių augalinių liekanų kiekį. Galimi durpių susiskaidymo laipsniai: silpnai susiskaidžiusios (32–44 %), silpnai arba vidutiniškai susiskaidžiusios (38–51 %), vidutiniškai susiskaidžiusios (44–57 %), vidutiniškai ir stipriai susiskaidžiusios (51–64 %), stipriai susiskaidžiusios (57–70 %) (LST 1957, 2010). Durpių susiskaidymo laipsnis leidžia spręsti apie durpių naudojimo paskirtį: labiau susiskaidžiusios tinka žemės ūkiui, mažiau – kompostui gaminti (Jinming, Xuehui 2009).

Durpių pluoštas yra sudarytas iš 1–5 % vandenyje tirpių medžiagų, 2–10 % bitumų, 20–40 % lengvai hidrolizuojamų junginių, 4–10 % celiuliozės, 15–50 % humuso rūgščių, 5–20 % lignino (Rydin, Jelgum 2013).

Durpės yra plačiai paplitusios kaip ekologiškos medžiagos. Jas termomechanškai aktyvavus, galima gauti ekologinį rišiklį termoizoliacinėms medžiagoms (Toropovs *et al.* 2012).

1.11. Kompozitų iš natūralių pluoštų formavimo technologija

Efektyvios termoizoliacinės medžiagos iš pluoštinių žaliavų gali būti gaminamos panašiai kaip neaustinės medžiagos tekstilės pramonėje. Neaustinių medžiagų (kompozitų iš natūralių pluoštų) gamyba vykdoma trimis etapais: pluoštų klogo formavimas, pluoštų klogo sujungimas, medžiagos apdorojimas įvairiais priedais (Stanys *et al.* 2012).

Prieš formuojant pluoštų kloadą, atliekamas pluoštų paruošimo procesas, kuris susideda iš mišinių sudėties nustatymo, kedenimo ir pirminio valymo, atskirų komponentų maišymo, visų komponentų maišymo (Kijauskas 1991).

Pluoštų kloadas karštuvais gali būti formuojamas dviem būdais: sausuoju ir šlapiuoju. Medžiagoms gaminti sausuoju būdu naudojamas pluoštas gali būti karšiamas plokščiaisiais arba veleniniais karštuvais (Stanys *et al.* 2008). Formuojant kloadą karšimo mašinoje pluoštas toliau yra kedenamas ir valomas adatytais skirtingu greičiu besisukančių būgnų paviršiais. Kuokšteliai pradedami skaidyti ir produktas ploninamas tarp adatų tiekimo cilindro ir priimtuvo (Kijauskas 1991).

Sausasis kloadas gali būti formuojamas pluošto kloadą sluoksniuojant. Sluoksniuojama įvairiais būdais, atsižvelgiant į tai, kokią norima gauti pluošto klogo masę ar pluošto klogo struktūrą (Stanys *et al.* 2008):

- išilgai orientuotų pluošto kloadų sluoksniavimas;
- skersai orientuotų pluošto kloadų formavimas vertikaliuoju ir horizontaliuoju sluoksniavimo būdu;
- vertikalusis pluošto kloadų sluoksniavimas.

Skersai orientuotų pluošto kloadų vertikalusis ir horizontalusis sluoksniavimas yra dažniausiai naudojami klogo sluoksniavimo būdai (Stanys *et al.* 2008).

Klogo šlapijo formavimo būdas susideda iš trijų etapų (Stanys *et al.* 2008):

1. Pluošto paskirstymas vandenyje.
2. Klogo formavimas.
3. Vandens pertekliaus pašalinimas, klogo suspaudimas ir džiovinimas.

Pluoštų klogo sujungimas gali būti: mechaninis (kljavimas dygsniais; adatinis; pluošto klogo plaukelių supynimas tūtomis veikiant vandens srautu), cheminis ir terminis (Russell 2007).

Užsienio autoriai Freivalde *et al.* (2014) šilumą izoliuojančias neaustines medžiagas iš kanapių pluošto formavo trimis technologiniais būdais siekdami

įvertinti kompozito formavimo poveikį degumo savybėms – pluošto klogo plaukeliams supinti tūtomis taikytas adatinis ir terminis būdai. Mvubu *et al.* (2015), norėdami pasiekti maksimalią medžiagos garso sugertį, kompozitą iš natūralių pluoštų formavo adatiniu būdu. Neaustinei medžiagai iš linų pluošto, naudojant rišiklius – polivinilo alkoholį (PVA) ir dvikomponentį poliamido pluoštą – pagaminti Fages *et al.* (2013) taikė šlapiąjį pluošto klogo formavimo būdą ir terminį sujungimą. Jie nustatė šio kompozito fizikines savybes.

1.12. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikta literatūros analizė parodė, kad pagal žaliavos išeigą, panaudojimą statybose didžiausią dalį natūralių pluoštų sudaro karnienos pluoštai. Šie pluoštai dėl struktūros ypatumų (akytumo, mažo skersmens bei mažo tankio) ir cheminės sudėties pasižymi geromis termoizoliacinėmis savybėmis. Tačiau pluošto mikrostruktūra labai priklauso nuo pluošto gavimo būdo, prigimties.
2. Analizuojant literatūrą nustatyta, kad natūralūs pluoštai: kanapės, linai, džutas ir kt., kompozitai, sudaryti iš natūralių pluoštų ir įvairių rišiklių, yra tinkami šilumos izoliavimo medžiagoms gaminti. Taip pat nustatyta, kad natūralūs pluoštai dėl gerų garso absorbuojančių savybių tinkami ir garso sugeriamosioms medžiagoms gaminti.
3. Atlikta literatūros analizė parodė, kad durpių pluoštas gali būti naudojamas kaip ekologiškas rišiklis termoizoliacinių medžiagų gamybai. Tačiau pastebėta, kad durpių pluošto savybės (tankis, šilumos laidumo koeficientas), struktūra yra mažai ištirtos. Taip pat analizės metu nustatyta, kad kitas efektyvus rišiklis, kuris gali būti panaudotas termoizoliaciniam kompozitui gaminti, yra PLA, kuris pasižymi termoplastinėmis ir biologinėmis savybėmis. Tačiau apie PLA šilumines savybes literatūroje taip pat nerašoma.
4. Dėl natūralių pluoštų ir jų kompozito neatsparumo ugniai ir didelės vandens sugerties būtina naudoti įvairius priedus ir specialius technologinius procesus, kurie sumažina medžiagos degumą ir vandens sugertį. Taip pat taikytini tokie priedai, kaip NaOH ir kt., kurie pagerina medžiagos stiprumines savybes – sustiprina pluoštų sukibimą tarpusavyje.

Siekiant įgyvendinti numatytą darbo tikslą, reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti mechaninio apdorojimo (smulkinimo, malimo, šukavimo) poveikį natūralių pluoštų (kanapių, linų ir durpių) fizikinėms savybėms.

2. Parinkti tinkamiausią pluoštų mechaninį apdorojimo būdą ir natūralų pluoštą termoizoliacinio kompozito sukūrimui.
3. Parinkti tinkamiausią rišiklį ir jo kiekį kompozito gamybai.
4. Nustatyti kompozito iš pluoštinių augalų struktūros formavimo poveikį fizikinėms ir mechaninėms savybėms.
5. Ištirti hidrofobinių ir antipireninių priedų poveikį medžiagų įmirkiui ir degumui.

Naudotų medžiagų bei natūralių pluoštų ir jų kompozitų tyrimų metodai

Šiame skyriuje aprašomos tyrimams naudotos medžiagos, jų apdorojimo būdai ir įranga, kompozitų iš natūralių pluoštų paruošimas, taikant įvairius technologinius veiksnius, pluoštų ir jų kompozitų savybių nustatymo tyrimų metodikos.

Skyriaus tematika paskelbti 4 autorės straipsniai (Stapulionienė 2013; Vaitkus *et al.* 2013; Stapulionienė *et al.* 2015; Stapulionienė *et al.* 2016).

2.1. Tyrimams naudotos medžiagos

2.1.1. Natūralūs pluoštai klando formavimui

Eksperimentiniams tyrimams naudotos natūralios žaliavos – klotėti ir neklotėti linų ir kanapių stiebai, taip pat kita organinės kilmės medžiaga – durpių pluoštas (naudotas ir kaip rišiklis). Pluoštinės kanapės ir pluoštiniai linai buvo gauti iš Šiaurės Lietuvos. Durpės buvo gautos iš Patyrio kaimo (Rietavo savivaldybė) durpyno. Šios žaliavos buvo apdorotos į įvairių rūšių pluoštus: ilgus ir trumpus linų; ilgus ir trumpus kanapių; ilgus ir trumpus šukuotus linų; ilgus ir trumpus šukuotus kanapių; maltus linų; maltus kanapių, maltus durpių (2.1 lentelė).

Pirminis kanapių ir linų stiebelių apdorojimo tikslas buvo išskirti iš stiebelių pluoštą. Siekiant atskirti kanapių ar linų pluoštą nuo sumedėjusio sluoksnio ir gauti pluoštą, tinkamą bandymams atlikti, buvo taikytos šios svarbiausios apdorojimo technologinės operacijos: 1) kanapių ar linų stiebeliai perdirbami voline mašina (pirminis kanapių ar linų perdirbimo etapas – dekortikavimas, kurio metu augalų stiebai laužomi, brukami, mušami); 2) po to kanapių ir linų pluoštas apdorojamas dantytais velenais (gaunamas ilgasis natūralių augalų pluoštas ir nedidelis kiekis spalių); 3) natūralus pluoštas antrą kartą apdorojamas dantytais velenais; 4) ilgas kanapių ir linų pluoštas po mechaninio apdorojimo kapojamas į (5–7) cm ir (2–3) cm ilgio pluoštą; 5) sukapotas natūralus pluoštas sumalamas peiliniu malūnu; 6) ilgas kanapių ir linų pluoštas po mechaninio apdorojimo šukuojamas šukuotuve ir po to kapojamas į (5–7) cm ir (2–3) cm ilgio pluoštą. Mechaninio apdorojimo metu lygiagrečiai buvo atliekamas kanapių ir linų pluošto valymo procesas (atskiriamas nedidelis spalių kiekis, dulkės). Durpių pluoštas buvo sumalamas peiliniu malūnu.

2.1 lentelė. Natūralių pluoštų parametrai

Table 2.1. Parameters of natural fibres

Natūralus pluoštas	Pluošto ilgis	Pluošto apdorojimas
Kanapių pluoštas	(5–7) cm	Dekortikuotas, liko nedidelis kiekis spalių
Kanapių pluoštas	(2–3) cm	Dekortikuotas, liko nedidelis kiekis spalių
Kanapių pluoštas	≥ 7 cm	Dekortikuotas, liko spalių
Kanapių pluoštas	(5–7) cm	Po mechaninio apdorojimo dantytais velenais (liko nedidelis kiekis spalių)
Kanapių pluoštas	(2–3) cm	Po mechaninio apdorojimo dantytais velenais (liko nedidelis kiekis spalių)
Kanapių pluoštas	(5–7) cm	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)
Kanapių pluoštas	(2–3) cm	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)
Kanapių pluoštas	(5–7) cm	Šukuotas
Kanapių pluoštas	(2–3) cm	Šukuotas
Kanapių pluoštas	≤ 2 cm	Maltas
Linų pluoštas	(5–7) cm	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)
Linų pluoštas	(2–3) cm	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)
Linų pluoštas	(5–7) cm	Šukuotas
Linų pluoštas	(2–3) cm	Šukuotas
Linų pluoštas	≤ 2 cm	Maltas
Linų pluoštas	≤ 2 cm	Maltas
Durpių pluoštas	≤ 2 cm	Maltas

Kiekviename natūralių pluoštų apdorojimo procese buvo gaunama skirtinga žaliavos išeiga, kuri buvo skirta bandymams, ir atitinkamas kiekis perdirbimo atliekų (spalių, pašukų, pakulų, dulkių) (2.2 lentelė). Siekiant nustatyti skirtingai apdoroto pluošto žaliavos išeigą, buvo ruošiama 50 kg pirminės žaliavos partija ir ją apdorojus sveriamas paruoštas bandymams pluoštas.

2.2 lentelė. Pluoštinių žaliavų išeiga po skirtingo pluošto apdorojimo

Table. 2.2. The yield of natural raw after different processing of fibres

Natūralus pluoštas	Pluošto apdorojimas	Žaliavos išeiga	
		Paruoštas pluoštas bandymams, %	Perdirbimo atlieka, %
Kanapių pluoštas (ilgas) ≥ 7 cm	Dekortikuotas, liko spalių	45	55
Kanapių pluoštas (5–7 cm)	Dekortikuotas, liko nedidelis kiekis spalių	39	61
Kanapių pluoštas (2–3 cm)	Dekortikuotas, liko nedidelis kiekis spalių	39	61
Kanapių pluoštas (5–7 cm)	Po mechaninio apdorojimo dantytais velenais (liko nedidelis kiekis spalių)	31	69
Kanapių pluoštas (2–3 cm)	Po mechaninio apdorojimo dantytais velenais (liko nedidelis kiekis spalių)	31	69
Kanapių pluoštas (5–7 cm)	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)	28	72
Kanapių pluoštas (2–3 cm)	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)	28	72
Kanapių pluoštas (5–7 cm)	Šukuotas	14	86
Kanapių pluoštas (2–3 cm)	Šukuotas	14	86
Kanapių pluoštas ≤ 2 cm	Maltas	15	85
Linų pluoštas (5–7 cm)	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)	24	76
Linų pluoštas (2–3 cm)	Po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (be spalių)	24	76
Linų pluoštas (5–7 cm)	Šukuotas	13	87
Linų pluoštas (2–3 cm)	Šukuotas	13	87
Linų pluoštas ≤ 2 cm	Maltas	15	85
Durpių pluoštas ≤ 2 cm	Maltas	20	80

Atsižvelgiant į disertaciniame darbe išsikeltus uždavinius, pirmiausiai įvertintas augalinių pluoštų mechaninio apdorojimo (smulkinimo, malimo, šukavimo) poveikis šilumos laidumo koeficientui.

2.1.2. Rišikliai

Durpių pluoštas – organinės kilmės medžiaga, susidariusi iš nevysiškai suirusių augalų, medienos liekanų ir humuso, yra durpės. Tyrimams buvo naudotos silpnai susiskaidžiusios aukštapelkės durpės, kurių susiskaidymo laipsnis (r rodiklis) siekė nuo 32 % iki 44 %, pH – nuo 3,5 iki 5,0.

Polilaktido pluoštas (PLA) tyrimams buvo gautas iš įmonės „NatureWorks™“ (Ingeo™). PLA stiklėjimo temperatūra – 55–60 °C, lydymosi temperatūra yra 130 °C, tankis – 1,27 g/cm³, pluošto ilgis – 51 mm. Šio pluošto pradinė žaliava yra kukurūzų krakmolos. Atsižvelgiant į neaustinių medžiagų gamintojų patirtį ir rekomendacijas, pasirinktas 11 % ir 15 % rišiklio kiekis.

2.1.3. Priedai

Hidrofobiniai priedai

Natūralūs pluoštai ir jų kompozitai pasižymi hidrofilinėmis savybėmis, todėl juos būtina hidrofobizuoti. Vandens sugerčiai sumažinti buvo pasirinkti tekstilės pramonėje naudojami fluoro ir anglies grandinę turintys hidrofobizatoriai – Beiphob FR, Tubiguard 13 ir Tubiguard 21. Šie hidrofobiniai priedai buvo gauti iš įmonės CHT-Bezema (Vokietija).

Beiphob FR yra fluoralkilakrilato kopolimeras C6 pagrindu, baltos spalvos, mažo klampumo skystis, kurio pH yra 4,0–5,0, tankis – 1,0 g/cm³. Jo džiovinimo temperatūra – 160 °C. Tubiguard 13 ir Tubiguard 21 yra fluoralkilakrilato kopolimeras C8 pagrindu. Tubiguard 13 yra baltos spalvos, mažo klampumo skystis, kurio pH yra 3,4–4,5, tankis – 1,0 g/cm³, apdorojimo temperatūra ~160 °C. Tubiguard 21 yra geltonos spalvos, mažo klampumo skystis, kurio pH – 4,0–6,0, o apdorojimo temperatūra ~160 °C

Degumą mažinantys priedai

Natūralūs pluoštai ir jų kompozitai pasižymi blogomis priešgaisrinėmis savybėmis – mažai atsparūs ugniai, todėl juos būtina apdoroti degumą mažinančiais priedais – antipirenais. Buvo pasirinkti tekstilės pramonėje naudojami neorganinių azoto ir fosforo druskų pagrindu pagaminti antipirenai: Flovan CGN ir Apyrol BKW. Flovan CGN buvo gautas iš „Huntsman“, Apyrol BKW – iš CHT-Bezema (Vokietija).

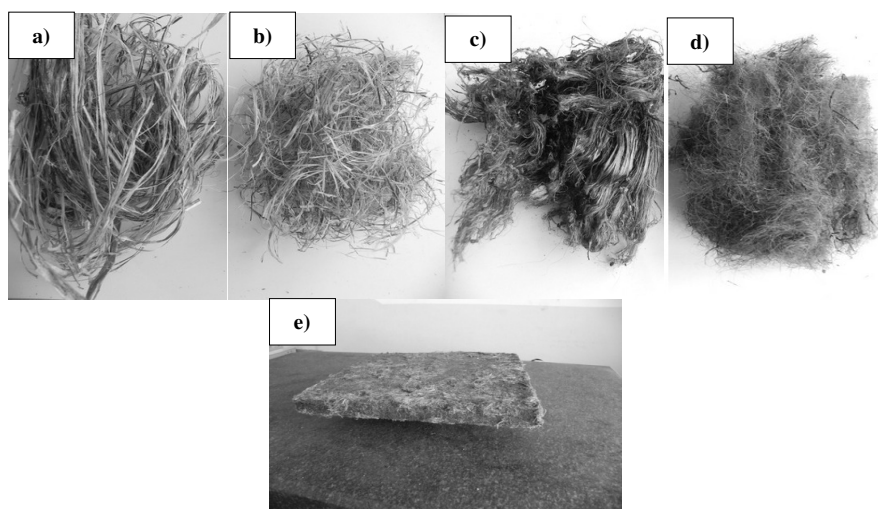
Flovan CGN pagrindinis komponentas – fosforo-azoto neorganinė druska (NH₄)₂ HPO₄. Tai skaidrus skystis, kurio pH yra 4,5–6,0, tankis – 1,19–2,30 g/cm³, apdorojimo temperatūra – 110–160 °C. Apyrol BKW yra pagamin-

tas fosforo ir sieros junginių pagrindu. Šis priedas yra skaidrus, bespalvis skystis, kurio pH – 6,0–7,0, tankis – 1,21 g/cm³. Apyrol BKW apdorojimo temperatūra – 150 °C.

2.2. Kompozitų paruošimas tyrimams

2.2.1. Kompozito iš kanapių ir durpių pluoštų sudėtis ir formavimo technologija

Termoizoliacinis kompozitas buvo suformuotas iš 50 % trumpojo kanapių pluošto, du kartus mechanškai apdoroto dantytais velenais, ir 50 % rišklio – durpių pluošto (2.1 pav.). Kompozitas buvo formuojamas sumaišant pluoštus ir juos aktyvuojant tam tikru kiekiu vandens. Gauta pluoštų masė buvo supilama į formą ir, kad pasišalintų vanduo, apspaudžiama. Gautas kompozitas buvo išlaikomas dvi paras (48 val.) džiovinimo spintoje 70 °C temperatūroje.



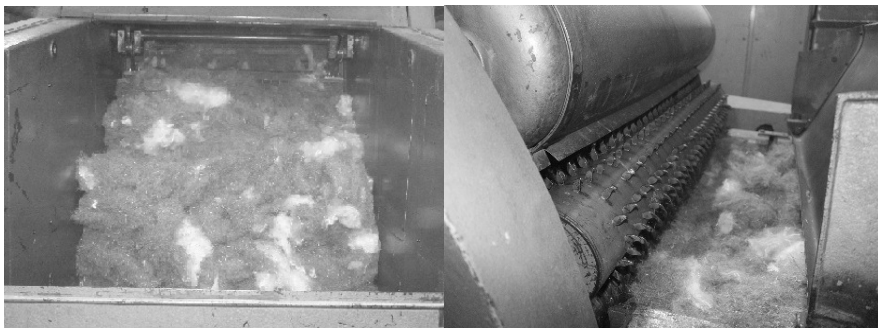
2.1 pav. Kompozitas iš kanapių ir durpių pluošto: a) neapdorotas kanapių pluoštas; b) trumpasis kanapių pluoštas (2–3 cm), du kartus mechanškai apdorotas dantytais velenais; c) neapdorotas durpių pluoštas; d) maltas durpių pluoštas; e) kompozitas

Fig. 2.1. Composite made from hemp and peat fibres: a) untreated hemp fibres; b) short hemp fibres (2–3 cm), mechanically processed by toothed shafts twice; c) untreated peat fibres; d) chopped peat fibres; e) composite

2.2.2. Kompozito iš kanapių ir polilaktido pluoštų sudėtis ir formavimo technologija

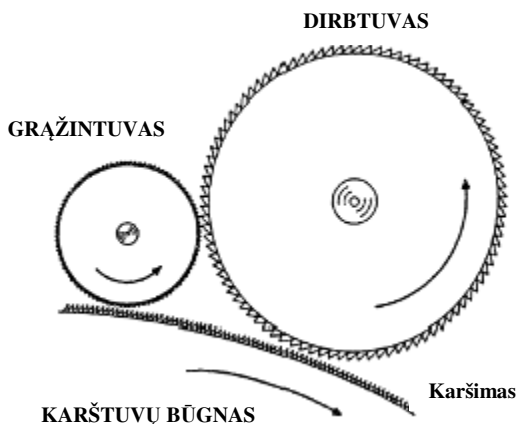
Termoizoliacinių medžiagų klodai buvo formuojami iš 85 % kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio bei iš 89 % kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio UAB „Ne-austima“ tekstilės technologijos linijoje. Kompozito iš pluoštinių žaliavų gamyba buvo vykdoma tokiais etapais: pluoštų maišymas, pluoštų karšinio formavimas, klodų sluoksniavimas, klando terminis apdorojimas ir klando suvyniojimas į ritinį.

Prieš pluošto klando formavimą kanapių ir PLA pluoštai buvo sumaišomi (2.2 pav.), po to buvo pradedamas karšimo procesas (2.3 pav.). Karšimas – pluošto ar kelių pluoštų mišinio masės valymas ir skaidymas į pavienius, dalinai orientuotus plaukelius (Stanys *et al.* 2008).



2.2 pav. Kanapių ir polilaktido pluoštų maišymas

Fig. 2.2. Mixing of hemp and polylactide fibres



2.3 pav. Karšimo procesas (Jirsak ir Wadsworth, 1999)

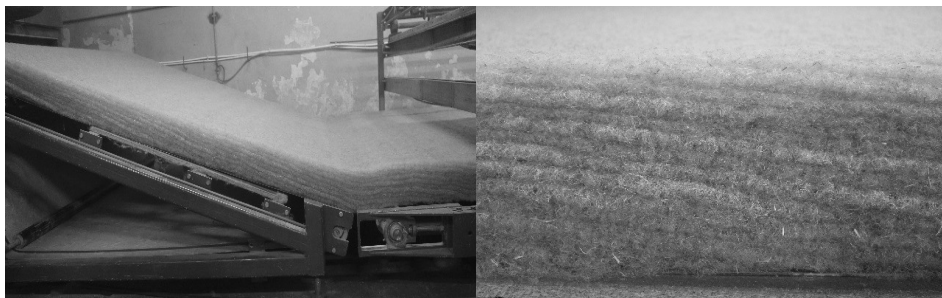
Fig. 2.3. Carding process (Jirsak and Wadsworth, 1999)

Po to, vykstant pluoštų karšimo procesui, pluošto sluoksnis buvo skaidomas tarp karštųjų būgno ir dirbtuvo (2.3 pav.). Grąžintuvas – tai veleninių karštųjų velenėlių adatyto paviršiumi, nuimantis pluoštus nuo dirbtuvo adatų ir grąžinantis juos ant karštųjų būgno dantukų. Tada pluoštas karšiamas dar kartą. Kiekvienas dirbtuvas ir grąžintuvas sudaro darbinę porą. Darbinės dalys aptrauktos adatine karšimo juosta su plonomis plieninėmis lanksčiomis adatomis. Dėl šių darbinių dalių sąveikos pluošto plaukeliai atskiriami vieni nuo kitų, iš dalies ištiesinami ir orientuojami, maišomi, išvalomos priemaišos ir ant nuimtuvo paviršiaus suformuojamas karšinys (2.4 pav.) (Stanys *et al.* 2012).



2.4 pav. Suformuotas pluoštų karšinys

Fig. 2.4. Formed web of carded fibres

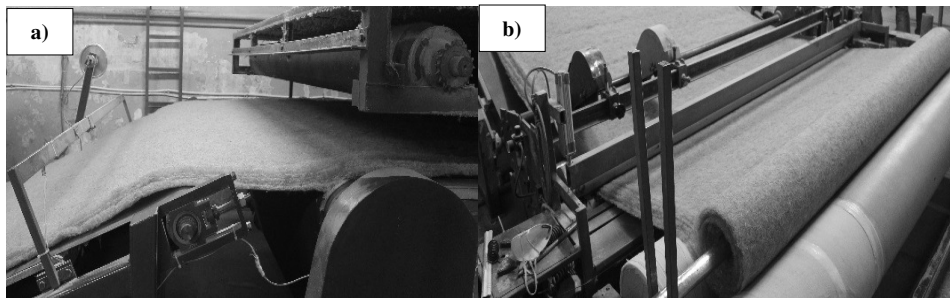


2.5 pav. Klado sluoksniavimas horizontaliuoju būdu

Fig. 2.5. Layering of web by horizontal method

Po to buvo formuojamas galutinis klotas – iškarštas pluošto klotas sluoksniuojamas skersai orientuotų pluošto klotų horizontaliuoju būdu (2.5 pav.). Klado sluoksniavimo laipsnis priklausė nuo norimos medžiagos tankio. Paruošti susluoksniuoti klotai transporterio juostomis buvo tiekiami į 130 °C temperatūros kaitinimo kamerą, kurioje susluoksniuotas klotas sutvirtinamas, kadangi išsilydęs PLA rišiklis susiriša su kanapių pluoštu. Klado storis kontroliuojamas

dviem būgnais, per kuriuos tiekama medžiaga. Suspausta medžiaga transporterio juostomis pašalinama iš kaitinimo kameros ir suvyniojama į ritinius (2.6 a, b).



2.6 pav. Termiškai apdorotas klotas: a) klotas tiekiamas iš kaitinimo kameros;
b) klotas vyniojimas

Fig. 2.6. Thermal treated web: a) web was conveyed out from oven; b) wrapping of web

2.3. Natūralių pluoštų ir jų kompozitų savybių nustatymo metodikos

2.3.1. Struktūros tyrimai

Buvo atliekami termoizoliacinių medžiagų iš natūralių pluoštų makro- ir mikrostruktūros tyrimai. Taip pat ištirta PLA rišiklio makro- ir mikrostruktūra.

Makrostruktūros tyrimai apėmė bendrą bandinio išvaizdos, dalelių išsidėstymo bandinyje, dalelių dydžio ir formos analizę. Natūralių pluoštinių žaliavų ir jų kompozitų paviršių makrostruktūros analizei atlikti naudotas kompiuterizuotas optinis mikroskopas „CMP-USMMICRO10“, turintis skaitmeninę kamerą (didinančią iki 200 kartų). Plaušelių parametrai buvo nustatomi panaudojant kompiuterinę vaizdo apdorojimo ir analizės programą *ImageTool*.

Mikrostruktūros tyrimai atlikti elektroniniu skenavimo mikroskopu „JEOL JSM-7600F“, kurio skiriamoji geba yra 1,5 nm. Tiriant pluoštinių žaliavų mikrostruktūrą, pagrindinis tikslas buvo ištirti atskirų plaušelių paviršių, t. y. iš ko sudarytas plaušelis. O tiriant termoizoliacinių medžiagų iš pluoštinių žaliavų mikrostruktūrą, pagrindinis tikslas buvo įvertinti plaušelių kontaktines zonas ir zonas, padengtas hidrofobiniais ir degumą mažinančiais priedais, t. y. plėvelių susidarymą. Bandinių mikrostruktūros tyrimams naudota didinamoji geba – 40–20 000 kartų.

2.3.2. Šilumos laidumo tyrimai

Iš pagamintų įvairių rūšių linų, kanapių pluoštų ir durpių pluoštų buvo formuojami bandiniai šilumos laidumo tyrimams. Jų matmenys buvo (300×300) mm, o storis – (40–100) mm. Suformuoti natūralių pluoštinių žaliavų bandiniai ne trumpiau kaip 24 val. buvo laikomi (23±2) °C temperatūros ir (50±5) % santykinio oro drėgnio sąlygomis.

Medžiagų šilumos laidumo tyrimai buvo atlikti pastovaus šilumos srauto metodu pagal LST EN 12667:2002 ir LST EN 12939:2002 reikalavimus. Bandymams naudotas kompiuterizuotas šilumos laidumo nustatymo įrenginys – „FOX 304“ (LaserComp). Įrenginio matavimo ribos buvo nuo 0,01 W/(m·K) iki 0,50 W/(m·K), matavimų tikslumas – ~1 %. Temperatūrų perkrytis tarp matavimo plokščių sudarė 20 °C. Šilumos laidumo koeficientai nustatyti vidutinėje 10 °C temperatūroje. Kiekvienas bandinys buvo apspaudžiamas vertikaliai judančia įrenginio viršutine plokšte iki pasirinkto bandinio storio, tokiu būdu parenkant numatytą bandinio tankį.

Kompozitams, sudarytiems iš kanapių pluošto ir rišiklio – durpių pluošto bei iš kanapių pluošto ir rišiklio – PLA, šilumos laidumo tyrimams buvo naudojamas tas pats prietaisas „FOX 304“ (LaserComp).

Siekiant nustatyti kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio, tankio poveikį šilumos laidumui, tyrimams naudoti skirtingo tankio bandiniai, kurių matmenys – (300×300×50) mm. Bandinio storio įtakai šilumos laidumui įvertinti naudoti skirtingo storio bandiniai – nuo 50 mm iki 100 mm. Kompozito iš kanapių ir durpių pluošto bandinių matmenys – (300×300×50) mm.

2.3.3. Mechaninių savybių tyrimai

Bandinių gniuždymo stipris buvo nustatomas pagal standarte LST EN 826:2013 nurodytus reikalavimus naudojant kompiuterizuotą įrangą „Hounsfield-H10KS“ ir pritaikytą programą „Qmat Professional“. Siekiant nustatyti kompozito iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio tankio ir rišiklio kiekio poveikį gniuždymo stipriui, buvo paruošta po 3 nustatyto tankio bandinius. Buvo suformuoti kompozito bandinių komplektai iš kanapių pluošto ir 11 % bei 15 % PLA rišiklio. Bandinių matmenys – (100×100×50) mm. Bandiniai buvo gniuždomi taip, kad jų gniuždomieji paviršiai būtų statmeni apkrovos veikimo kryptčiai, o gniuždymas vyktų vertikalia ašimi. Pradinė bandinių suslėgimo apkrova – (250±10) Pa. Bandymai buvo atliekami gniuždymo apkrovą didinant pastoviu 0,1 d/min greičiu esant ne didesniai kaip ±25 % nuokrypiui (čia d – bandinių storis, mm). Atliekant bandymus buvo braižomos jėgos – deformacijos kreivės, rodančios deformacijos priklausomybę nuo jėgos. Jėgos ir deformacijos kreivės suteikia papildomos informacijos apie gaminio būseną gniuždymo bandymų metu. Naudojant įrenginio

„Hounsfield-H10KS“ programinę įrangą buvo nustatyti gniuždymo įtempiai iki 10 % bandinio deformacijos.

Siekiant nustatyti kompozito bandinių formavimo būdo poveikį gniuždymo stipriui, bandiniai, sudaryti iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio bei kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, kurių tankis – 40 kg/m^3 , matmenys – $(100 \times 100 \times 50) \text{ mm}$, buvo gniuždomi taip, kad jų kaip gniuždomieji paviršiai būtų abu šoniniai $(100 \times 50) \text{ mm}$ paviršiai, t. y. bandiniai buvo gniuždomi ne tik z, bet ir x, ir y ašių kryptimis.

Kompozito iš pluoštinių žaliavų bandinių statmeno paviršiams tempimo stipris nustatytas pagal LST EN 1607:2013 standarte nurodytą metodiką. Bandymui buvo paruošta po tris 40 kg/m^3 tankio bandinius, esant skirtingiems rišiklio kiekiams (matmenys – $(100 \times 100 \times 50) \text{ mm}$). Bandiniai buvo priklijuojami prie dviejų kietų plokščių ir bandomi tempimo įrenginiu „Hounsfield-H10KS“, užtikrinančiu reikiamą jėgą ir poslinkį bei turinčiu pastovų greitį $(10 \pm 1) \text{ mm/min}$ ir galinčiu išmatuoti jėgą ± 1 % tikslumu. Po to buvo užrašoma tempimo jėga ir apskaičiuojamas bandinio tempimo stipris. Prieš tai bandiniai buvo 24 val. kondicionuojami $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ temperatūros ir $(50 \pm 5) \%$ santykinio oro drėgnio sąlygomis.

Kompozito iš pluoštinių žaliavų bandinių lygiagreto su paviršiais tempimo stipris nustatytas pagal LST EN 1608:2013 standarte nurodytą metodiką. Bandinys buvo prijungiamas prie dviejų griebtuvų, įtvirtinamas tempimo mašinoje „Hounsfield-H10KS“ ir tempiamas $(10 \pm 1) \text{ mm/min}$ greičiu. Suirus bandiniui, užrašoma didžiausia tempimo jėga ir apskaičiuojamas bandinio lygiagreto su paviršiais tempimo stipris.

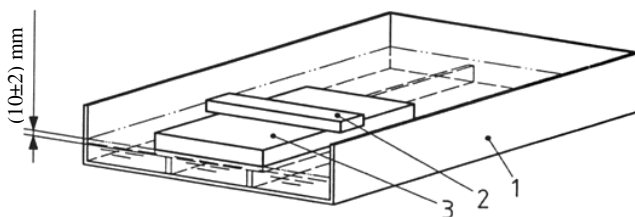
Siekiant nustatyti kompozito bandinių formavimo krypčių ir rišiklio kiekio poveikį lygiagreto su paviršiais tempimo stipriui, bandiniai iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio bei kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, kurių tankis yra 40 kg/m^3 , matmenys – $(300 \times 150 \times 50) \text{ mm}$, buvo tempiami skersai ir išilgai formavimo krypčių. Bandiniai taip pat buvo 24 val. kondicionuojami $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ temperatūroje ir esant $(50 \pm 5) \%$ santykiniam oro drėgniui.

2.3.4. Garso sugerties koeficiento nustatymas

Garso sugerties koeficientas (įprastas sklidimas) buvo matuojamas kompleksinės akustinės varžos vamzdžiu, taikant LST EN ISO 10534-1 „Akustika. Garso sugerties koeficiento ir pilnutinės varžos nustatymas interferometrais“ nustatytą procedūrą. Vamzdžio vidinis skersmuo buvo 85 mm ir ilgis – 1000 mm. Taikant šį metodą, galima lengvai gauti įprasto sklidimo parametrų matavimų rezultatus, naudojant mažus bandinėlius. Bandymo metu dažnių intervalas kito nuo 150 Hz iki 2000 Hz, bandinių storis buvo 50 mm.

2.3.5. Trumpalaikės vandens sugerties nustatymas

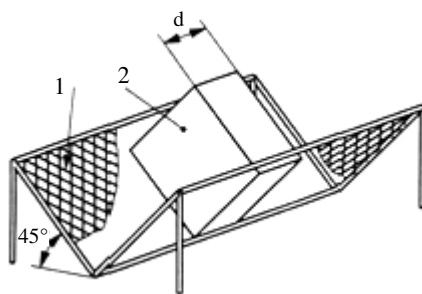
Trumpalaikė vandens sugertis buvo nustatoma pagal LST EN 1609:2013 standarto A metodą. Suformuoti kompozito iš pluoštinių žaliavų bandiniai, kurių matmenys – $(100 \times 100 \times 50)$ mm, buvo sveriami $0,1$ g tikslumu ir įdedami į tuščią indą. Ant bandinių buvo uždedama reikiama apkrova, kad jie išsilaikytų iš dalies panardinti, ir atsargiai pripilama vandens, kad bandinio apatinis paviršius būtų (10 ± 2) mm žemiau vandens paviršiaus (2.7 pav.).



2.7 pav. Bandinių, laikomų iš dalies panardintų vandenyje, trumpalaikės vandens sugerties nustatymo įrangos schema: 1 – vandens indas; 2 – apkrova bandiniui išlaikyti vienoje padėtyje; 3 – bandinys

Fig. 2.7. Principal scheme of short term water absorption test: 1 – water tank; 2 – load which keeps the specimen in the water; 3 - specimen

Po 24 val. ± 30 min, bandiniai buvo išimami ir nusausinami – $(10 \pm 0,5)$ min išlaikomi ant tinklo, palinkusio 45° kampu, kaip parodyta 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Bandinių sausavimo įrangos schema. 1 – tinklas; 2 – bandinys

Fig 2.8. Equipment for specimens drying. 1 – grid; 2 – specimen

Po to jie buvo pasveriami ir palaikytų iš dalies panardintų vandenyje bandinių trumpalaikė sugertis apskaičiuojama pagal šias formules:

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p}, \text{ kg/m}^2, \quad (2.1)$$

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{m_0} \cdot 100, \% \text{ (pagal masę)}, \quad (2.2)$$

čia W_p – trumpalaikė vandens sugertis, kg/m^2 ; W – trumpalaikė vandens sugertis, % pagal masę; m_0 – pradinė bandinio masė, kg; m_{24} – bandinio masė, išlaikius jį iš dalies panardintą vandenyje 24 val., kg; A_p – bandinio apatinio paviršiaus plotas, m^2 .

Norint sumažinti kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio, vandens sugertį, kaip jau minėta 2.1.3 sk., bandymams buvo parinkti trijų tipų hidrofbizatoriai: Beiphob FR, Tubiguard 13, Tubiguard 21. Parenkant hidrofbizatorius, buvo atsižvelgiama į priedų tinkamumą natūraliems pluoštams, į jų apdorojimo temperatūrą ir medžiagų apdorojimo šiais priedais būdus (užpurškimo, mirkymo). Bandymams buvo paruošta po tris bandinėjus, kiekvienam tokiame komplektuiparenkant skirtingą hidrofbizatorių tirpalų koncentraciją (2.3 lentelė).

Papildomai kanapių ir PLA pluoštai buvo išdžiovinami (23 ± 2) °C temperatūros ir (50 ± 5) % santykinio oro drėgnio aplinkoje bei 20 min. išlaikyti 130 °C temperatūroje. Po to šie pluoštai buvo palaikyti iš dalies panardinti vandenyje, paskui išdžiovinami ir papildomai nustatyta jų vandens sugertis.

2.3 lentelė. Bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 15 % polilaktido pluošto rišiklio, naudojant skirtingus hidrofbizatorius, sudėtis

Table 2.3. Composition of specimens made from hemp fibres and 15 % of polylactide fibres binder with different hydrophobizers

Hidrofbizatoriai	Hidrofbizatoriaus tirpalo koncentracija, g/l			
Beiphob FR	0,25	0,75	1,25	1,75
Tubiguard 13				
Tubiguard 21				

2.3.6. Pralaidumo vandens garams nustatymas

Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, 40 kg/m^3 tankio bandinių pralaidumo vandens garams savybės buvo nustatomos reguliuojamo temperatūrinio režimo kameroje pagal LST EN 12086:2013 metodiką. Bandiniai įstatyti ir užsandarinti atviro bandymui skirtos indo viršuje, kurio viduje buvo prisotintas $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ vandeninis tirpalas. Šis įrenginys su bandiniu buvo

2.3.8. Eksperimentinių tyrimo rezultatų statistinis apdorojimas

Atliekant duomenų eksperimentinę analizę buvo taikomi matematiniai statistiniai metodai. Matematiniai statistiniai metodais apdorojant eksperimentinius duomenis, galima tiksliai įvertinti gautų verčių nuokrypį, nustatyti pasiskirstymo funkcijas ir parametrus. Darbe tiesinė ir netiesinė koreliacija buvo taikyta optimaliam Y ir X kintamųjų tarpusavio ryšiui nustatyti. Netiesinės funkcijos buvo transformuojamos į tiesines, naudojant programą STATISTICA, leidžiančią rasti įvairius netiesinių lygčių parametrus (b_0, b_1, \dots, b_n – eksperimentiniai duomenys, gauti mažiausiųjų kvadratų metodu, apskaičiuoti pastovieji koeficientai) (Aivazyan 1968).

Optimalus modelis matematiniam ryšiui nustatyti buvo parenkamas po to, kai buvo palyginti keleto modelių tinkamumą apibūdinantys determinacijos koeficientai. Kai ryšys tiesinis, kaip determinacijos koeficientas taikomas koreliacijos koeficiento kvadratas r^2 , kai netiesinis – koreliacijos santykio kvadratas η^2 (Lakin 1990).

Pagal determinacijos koeficientą galima sudaryti dviejų dydžių ryšio glaudumo vertinimo R skalę: esant $R > 0,9$, ryšys laikomas labai stipriu; esant $R > 0,7 - 0,9$, ryšys laikomas stipriu; esant $R = 0,5 - 0,7$, ryšys yra vidutinio stiprumo; kai $R < 0,5$, ryšys silpnas. Esant stipriam ryšiui 50 % , Y dydžio variacijos priklauso nuo X dydžio variacijos (Sokal, Rohlf 1998).

Siekiant įvertinti eksperimentinių rezultatų sklaidą abipus regresijos linijos, buvo priimtas vidutinis kvadratinis nuokrypis S_r (eksperimentinių duomenų nuokrypio nuo regresijos linijos absoliučioji vidutinė įverčio vertė).

Be taškinų prognozinių verčių \bar{Y}_{x_i} , buvo apskaičiuojamos galimų klaidų vertės δ , kurios leidžia pereiti prie intervalinio prognozavimo:

$$Y_{x_i}^{prog.} = \bar{Y}_{x_i} \pm \delta, \quad (2.3)$$

čia \bar{Y}_{x_i} – taškinės prognozės vertė, apskaičiuota pagal gautą lygtį.

Pagal Chetyrkin (1977) galimų klaidų vertės apskaičiuojamos taip:

$$\delta = t_{\alpha} \cdot S_r, \quad (2.4)$$

čia t_{α} – Stjudento kriterijus, kurio vertė parenkama atsižvelgiant į laisvės laipsnių skaičių $f = m - n$, kai prognozės pasikliaujamoji tikimybė (jei kriterijus vienpusis) $P = 0,90$ (Sachs 1976).

Taip pat darbe atlikta daugialypė koreliacija, trijų dydžių Y, X, Z tarpusavio priklausomybė (Lvovsky 1982).

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad gaminant efektyvias termoizoliacines medžiagas iš natūralių pluoštų, būtina įvertinti pluoštų mechaninio apdorojimo poveikį pluoštų struktūrai bei nustatyti pluoštų išeigą.
2. Nustatyta, kad tinkamos pluoštinių rišiklių, hidrofobizuojančių ir degumą slopinančių priedų savybės bei jų kiekiai leidžia gauti racionalias termoizoliacinio kompozito sudėtis.
3. Nustatyta, kad pritaikius neaustinių medžiagų technologiją, galima sukurti efektyvų termoizoliacinį kompozitą iš pluoštinių žaliavų, kuris gali būti panaudojamas karkasinių pastatų statyboje.
4. Norint panaudoti pluoštinį kompozitą kaip efektyvią termoizoliacinę medžiagą, būtina kompleksškai ištirti fizikines ir mechanines savybes. Tyrimams tikslinga naudoti standartinius bandymų metodus – šilumos laidumo, garso sugerties, gniuždymo stiprio, tempimo stiprio, trumpalaikės vandens sugerties, pralaidumo vandens garams, degumo – bei įvertinti termoizoliacinio kompozito makro- ir mikrostruktūrą.

Pluoštų ir jų kompozitų struktūrinių, šiluminių ir stipruminių rodiklių eksperimentinių tyrimų rezultatai

Šių tyrimų tikslas – ištirti natūralius pluoštus, nustatyti technologinių veiksnių (mechaninio apdorojimo – smulkinimo, malimo, šukavimo) įtaką makro- ir mikrostruktūrai bei šilumos laidumo koeficientui, parinkti tinkamiausią natūralų pluoštą ir rišiklį termoizoliaciniam kompozitui formuoti, ištirti gauto iš natūralių pluoštų, naudojant rišiklį, kompozito struktūrą bei fizikines ir mechanines savybes.

Šiame skyriuje aprašytas natūralių pluoštų (kanapių, linų, durpių) bei sintetinių pluoštų (PLA) technologinių parametrų poveikis struktūrai ir šilumos laidumo koeficientui. Nustatyta, kad tinkamiausia žaliava termoizoliacinio kompozito gamybai yra trumpasis kanapių pluoštas, du kartus mechaniniu būdu apdorotas dantytais velenais. Taip pat parinkti du rišikliai (PLA, durpių pluoštas) kompozitų gamybai. Suformavus kompozitą iš natūralių pluoštų ir rišiklio, atlikti struktūros tyrimai, šilumos laidumo, gniuždymo, tempimo, trumpalaikės vandens sugerties, pralaidumo vandens garams ir degumo tyrimai bei pateikta rezultatų analizė.

Skyriaus tematika paskelbti 4 autorės straipsniai (Stapulionienė 2013; Vaitkus *et al.* 2013; Stapulionienė *et al.* 2015; Stapulionienė *et al.* 2016).

3.1. Medžiagų iš natūralių pluoštų struktūros tyrimai

Galima teigti, kad nuo medžiagos makro- ir mikrostruktūros, t. y. nuo plaušelių dydžio ir formos, bei nuo to, kaip išsidėsto plaušeliai gaminio struktūroje, labai priklauso medžiagos šilumos laidumas. Gauti medžiagų iš natūralių pluoštų šilumos laidumo rezultatai bei atlikta medžiagų struktūros ir šilumos laidumo sąryšio analizė parodė, kad didelį poveikį medžiagos makro- ir mikrostruktūrai daro pluoštų mechaninis apdorojimas.

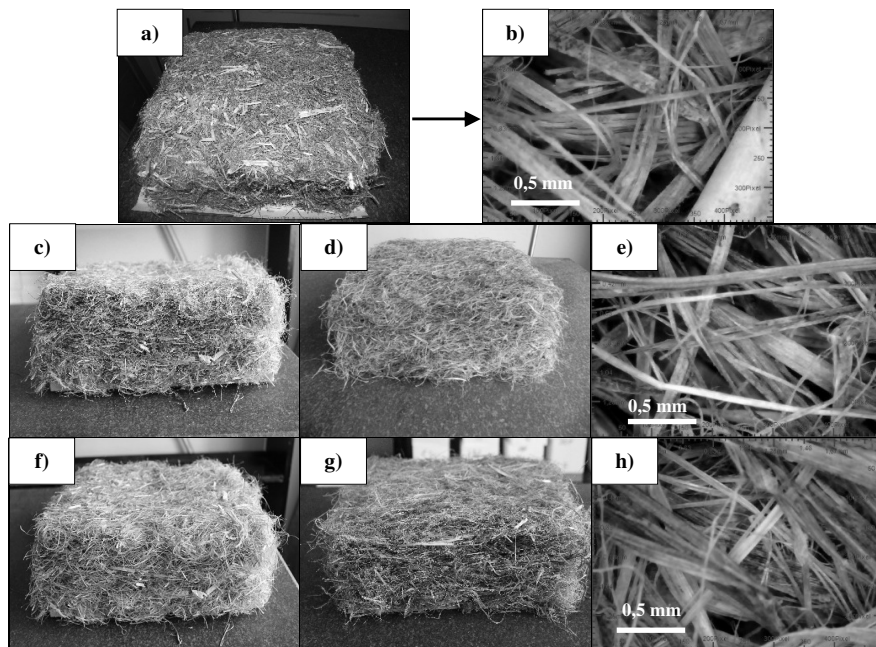
3.1.1. Natūralių pluoštų makro- ir mikrostruktūra

3.1, 3.2 ir 3.3 paveiksluose pateiktos suformuotų bandinių iš natūralių pluoštų, apdorotų pritaikius technologinius veiksnius (mechaninį apdorojimą – smulkinimą, malimą, šukavimą), bendras vaizdas ir jų per mikroskopą darytos makrostruktūros nuotraukos. Kaip matome iš bendro vaizdo, kiekvienu atveju gautų medžiagų paviršiai labai panašūs plaušelių išsidėstymo specifika. Bandiniuose jie išsidėstę chaotiškai – netvarkingai vienas kito atžvilgiu, persipynę tarpusavyje, taip sudarydami vadinamąjį erdvinį karkasą. Autorius (Kaminskas 2002) aiškina, kad kai daugybė plaušelių yra išsidėstę tam tikra tvarka vienas kito atžvilgiu ir persipynę tarpusavyje, sudarydami didelį kiekį kontaktinių zonų, tokį išsidėstymą galima vadinti „erdvine sistema“. Kadangi pluoštai yra skirtingai apdoroti, tai jų plaušelių storis kinta nuo 20 μm iki 600 μm .

3.1 paveiksle, b, e, h parodyti chaotiškai orientuoti kanapių plaušeliai, tarp kurių vizualiai matosi susidarę dideli oro tarpai. Taip pat reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad vyrauja didelis plaušelių storis, kuris kinta nuo 120 μm iki 700 μm , bei mažas plaušelių susikirtimo vietų kiekis, tačiau didelis kontaktinių zonų plotas. Tikėtina, kad visa tai lemia pluošto apdorojimo būdas. Šiuo atveju pluoštas buvo gautas dekortikuojant pluoštinių kanapių stiebus ir vieną kartą mechaniškai apdorojant dantytais velenais. Tačiau tarp plaušelių, kurie buvo gauti po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais (3.2 pav. b ir 3.3 pav. c), oro tarpai yra gerokai mažesni. Šitai apdoroto pluošto matomas mažesnis plaušelių storis (40–450 μm), nei dekortikuoto bei vieną kartą mechaniškai apdoroto dantytais velenais pluošto. Panaši struktūra akivaizdi 3.2 paveiksle, e ir 3.3 paveiksle, f, tačiau aiškiai matyti, kad šukuotų kanapių ir linų plaušelių storis yra labai mažas, kintantis nuo 20 μm iki 160 μm . Bandinių iš malto kanapių (3.2 pav. g), linų ir durpių pluoštų, kurių storis – 15–150 μm , makrostruktūra (3.3 pav. h, j) išsiskiria tuo, kad joje vyrauja smulkios dalelės – dulkės, vizualiai matyti oro tarpai tarp dalelių. Todėl galima teigti, kad šiuose bandiniuose iš maltų natūralių pluoštų kontaktinių zonų plotas sumažėja, bet padidėja susikirtimo vietų kiekis.

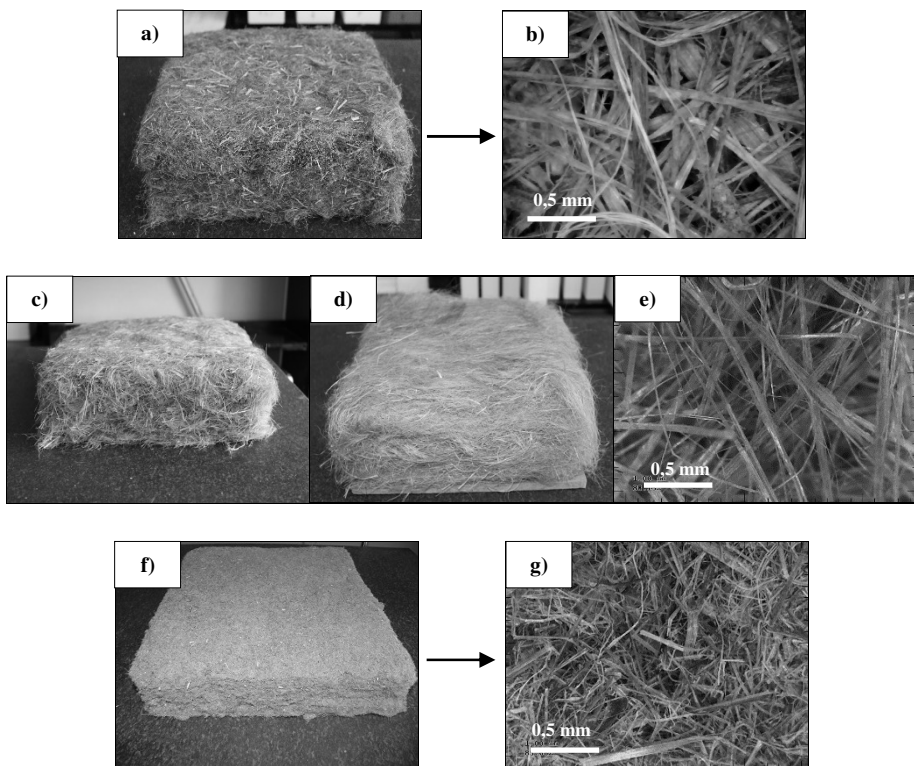
Šilumos laidumo požiūriu per plonesnius plaušelius kietuoju medžiagos karkasu vyksta mažiau intensyvus šilumos perdavimas šiluminio laidumo būdu,

t. y. vienodo tūrio medžiagoje susidaro daugiau smulkių oro tarpų, nei esant stambesniems plaušeliams. Didelis kiekis oro tarpų tarp plaušelių lemia lėtesnį šilumos perdavimą šiluminiu laidumu dujomis.



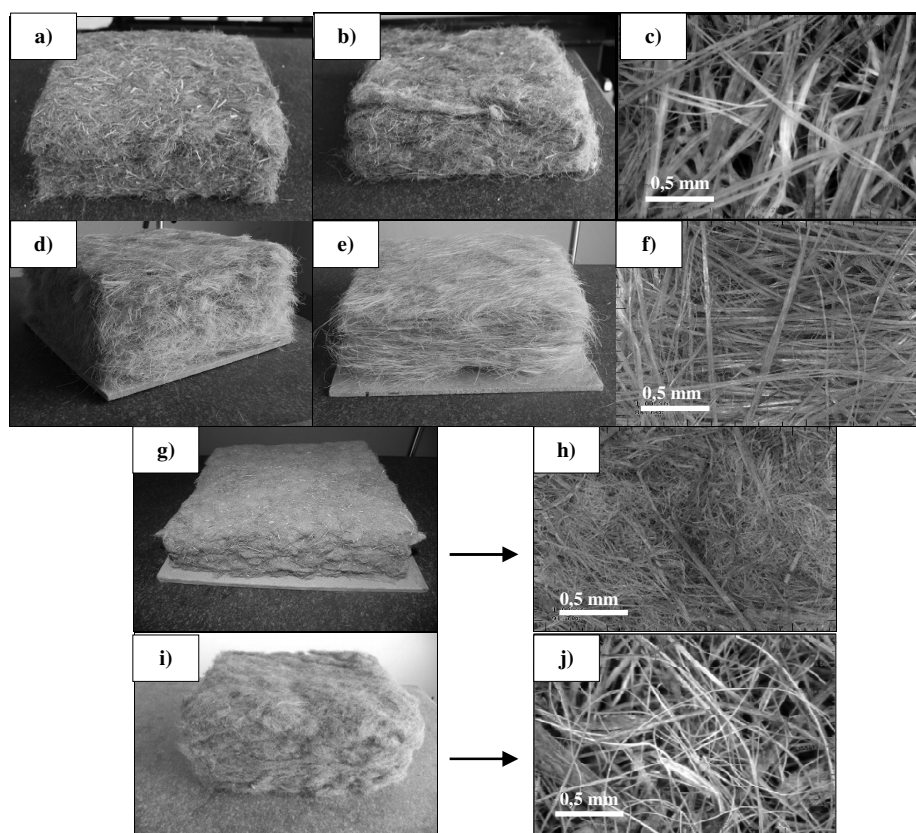
3.1 pav. Suformuotų bandinių iš kanapių pluošto makrostruktūra: a) dekortikuoto kanapių pluošto su spaliais bendras vaizdas; b) dekortikuotų kanapių plaušelių su spaliais išsidėstymas bandinyje; c) dekortikuoto kanapių pluošto (2–3 cm) be spalių bendras vaizdas; d) dekortikuoto kanapių pluošto (5–7 cm) be spalių bendras vaizdas; e) dekortikuotų kanapių plaušelių be spalių išsidėstymas bandinyje; f) kanapių pluošto (2–3 cm) po mechaninio apdorojimo dantytais velenais bendras vaizdas; g) kanapių pluošto (5–7 cm) po mechaninio apdorojimo dantytais velenais bendras vaizdas; h) kanapių plaušelių po mechaninio apdorojimo dantytais velenais išsidėstymas bandinyje

Fig. 3.1. Macrostructure of the formed specimens from hemp fibres: a) general view of long decorticated hemp fibres with shives; b) distribution of long decorticated hemp fibres with shives in the specimen; c) general view of decorticated hemp fibres (2–3 cm) without shives; d) general view of decorticated hemp fibres (5–7 cm) without shives; e) distribution of decorticated hemp fibres without shives in the specimen; f) general view of hemp fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts once with a small amount of shives; g) general view of hemp fibres (5–7 cm) processed mechanically by toothed shafts once with a small amount of shives h) distribution of hemp fibres processed mechanically by toothed shafts once with a small amount of shives in the specimen



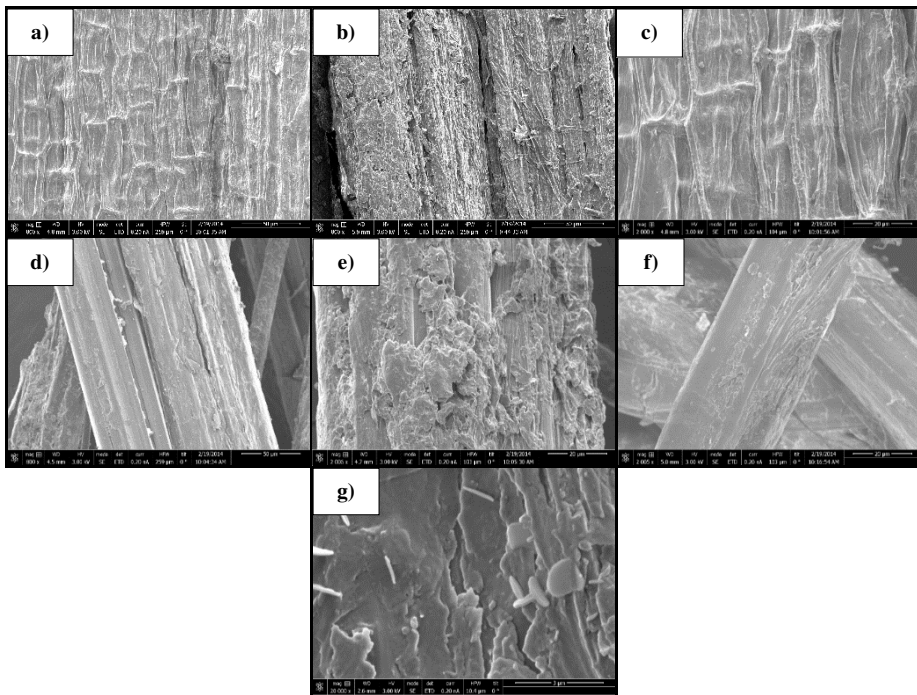
3.2 pav. Suformuotų bandinių iš kanapių pluošto makrostruktūra: a) kanapių pluošto (2–3 cm) po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais bendras vaizdas; b) kanapių plaušelių po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais išsidėstymas bandinyje; c) šukuoto kanapių pluošto (2–3 cm) bendras vaizdas; d) šukuoto kanapių pluošto (5–7 cm) bendras vaizdas; e) šukuotų kanapių plaušelių išsidėstymas bandinyje; f) malto kanapių pluošto bendras vaizdas; g) maltų kanapių plaušelių išsidėstymas bandinyje

Fig. 3.2. Macrostructure of the formed specimens from hemp fibres: a) general view of hemp fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts twice; b) distribution of hemp fibres processed mechanically by toothed shafts twice in the specimen; c) general view of combed hemp fibres (2–3 cm); d) general view of combed hemp fibres (5–7 cm); e) distribution of combed hemp fibres in the specimen; f) general view of chopped hemp fibres; g) distribution of chopped hemp fibres in the specimen



3.3 pav. Suformuotų bandinių iš linų ir durpių pluošto makrostruktūra: a) linų pluošto (2–3 cm) po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais bendras vaizdas; b) linų pluošto (5–7 cm) po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais bendras vaizdas; c) linų plaušelių po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais išsidėstymas bandinyje; d) šukuoto linų pluošto (2–3 cm) bendras vaizdas; e) šukuoto linų pluošto (5–7 cm) bendras vaizdas; f) šukuotų linų plaušelių išsidėstymas bandinyje; g) malto linų pluošto bendras vaizdas; h) maltų linų plaušelių išsidėstymas bandinyje; i) maltas durpių pluošto bendras vaizdas; j) maltų durpių plaušelių išsidėstymas bandinyje

Fig. 3.3. Macrostructure of the formed specimens from flax and peat fibres: a) general view of flax fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts twice; b) general view of flax fibres (5–7 cm) processed mechanically by toothed shafts twice; c) distribution of flax fibres processed mechanically by toothed shafts twice in the specimen; d) general view of combed flax fibres (2–3 cm); e) general view of combed flax fibres (5–7 cm); f) distribution of combed flax fibres in the specimen; g) general view of chopped flax fibres; h) distribution of chopped flax fibres in the specimen; i) general view of chopped peat fibres; j) distribution of chopped peat fibres in the specimen

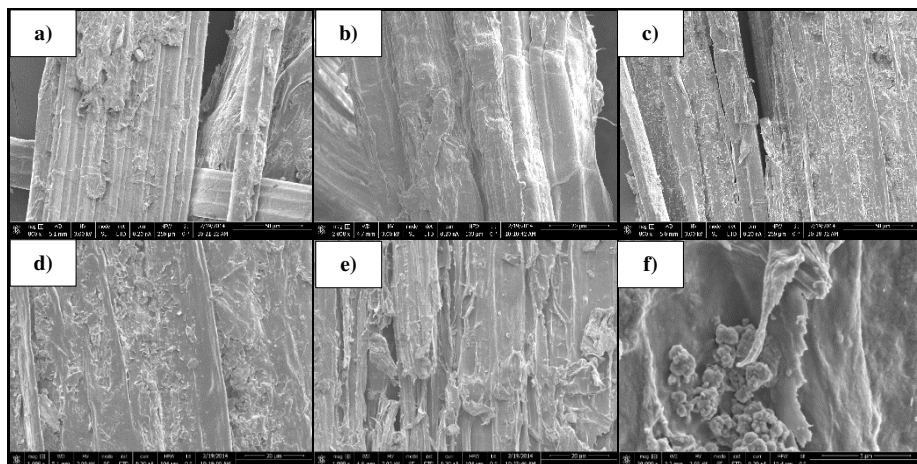


3.4 pav. Bandinių iš kanapių pluošto mikrostruktūra (padidinta): a) dekortikuoto kanapių pluošto ($\times 800$); b) kanapių pluošto po mechaninio apdorojimo dantytais velenais ($\times 800$); c) kanapių pluošto po mechaninio apdorojimo dantytais velenais ($\times 2\,000$); d) šukuoto kanapių pluošto ($\times 800$); e) šukuoto kanapių pluošto ($\times 2\,000$); f) malto kanapių pluošto ($\times 2\,000$); g) malto kanapių pluošto ($\times 20\,000$)

Fig. 3.4. Microstructure of the specimens from hemp fibres (magnified): a) decorticated hemp fibres ($\times 800$); b) hemp fibres processed mechanically by toothed shafts ($\times 800$); c) hemp fibres processed mechanically by toothed shafts ($\times 2\,000$); d) combed hemp fibres ($\times 800$); e) combed hemp fibres ($\times 2\,000$); f) chopped hemp fibres ($\times 2\,000$); g) chopped hemp fibres ($\times 20\,000$)

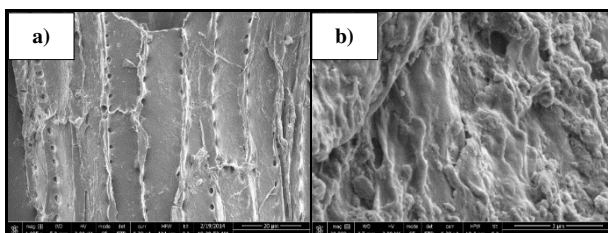
Natūralių pluoštų mikrostruktūra pavaizduota 3.4, 3.5, 3.6 paveiksluose. Atliekant kanapių, linų, durpių pluoštų mikrostruktūros analizę (3.4, 3.5, 3.6 pav.), matyti, kad pluoštų apdorojimo (smulkinimo, malimo, šukavimo) metu (3.4 pav. b, e, g; 3.5 pav. a, d, f; 3.6 pav. b) atsiranda pažeistų plaušelių, smulkių dalelių – organinių priemaišų. Malto natūralaus pluošto mikrostruktūroje (3.4 pav. g, 3.5 pav. f, 3.6 pav. b) aiškiau matomos smulkios dalelės – dulkės, kadangi prieš malant, pluoštas jau buvo mechaniškai apdorotas dantytais velenais. Taigi pluošto gijelės buvo trupinamos netgi tris kartus – du kartus mechaninio apdorojimo dantytais velenais ir galiausiai pluošto malimo metu. Malto durpių pluošto mikrostruktūros analizė (3.6 pav. a) rodo, kad durpių plaušelis

yra smulkiai akytas, sluoksniuotas, matomos tam tikros išilginės rievės. Pluošto, gauto po mechaninio apdorojimo dantytais velenais, mikrostruktūra labai panaši (3.4 pav. c): plaušelio paviršius sluoksniuotas, rievėtas.



3.5 pav. Bandinių iš linų pluošto mikrostruktūra (padidinta): a) linų pluošto po mechaninio apdorojimo dantytais velenais ($\times 800$); b) linų pluošto po mechaninio apdorojimo dantytais velenais ($\times 2\,000$); c) šukuoto linų pluošto ($\times 800$); d) šukuoto linų pluošto ($\times 2\,000$); e) malto linų pluošto ($\times 2\,000$); f) malto linų pluošto ($\times 20\,000$)

Fig. 3.5. Microstructure of the specimens from flax fibres (magnified): a) flax fibres processed mechanically by toothed shafts ($\times 800$); b) flax fibres processed mechanically by toothed shafts ($\times 2\,000$); c) combed flax fibres ($\times 800$); d) combed flax fibres ($\times 2\,000$); e) chopped flax fibres ($\times 2\,000$); f) chopped flax fibres ($\times 20\,000$)



3.6 pav. Bandinių iš malto durpių pluošto mikrostruktūra (padidinta): a) $\times 2\,000$; b) $\times 20\,000$

Fig. 3.6. Microstructure of specimens from peat fibres (magnified): a) $\times 2\,000$; b) $\times 20\,000$

Tuo tarpu iš 3.4 paveikslo, a matyti, kad pluoštas, gautas dekortikuojant kanapių stiebus, yra be pažeidų – jokio mechaninio poveikio požymių nematyti.

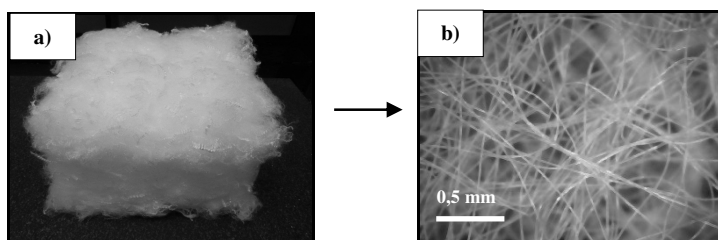
Taip pat iš įvairiai apdorotų pluoštų bendro vaizdo (3.4 pav. b, d, f; 3.5 pav. a, c, e) matyti, kad plaušeliai yra sluoksniuoti – padalyti į išilgines juostas. Taigi, kaip ir teigė Mažonienė ir Bendoraitienė (2008), natūralių pluoštų mikrostruktūra labai priklauso nuo pluošto gavimo būdo bei sąlygų.

3.1.2. Polilaktido pluošto makro- ir mikrostruktūra

Atlikus literatūros analizę (žr. 1.10 poskyrį), termoizoliaciniam kompozitui iš natūralių pluoštų surišti buvo pasirinktas PLA rišiklis, susintetintas iš kukrūzų krakmolo.

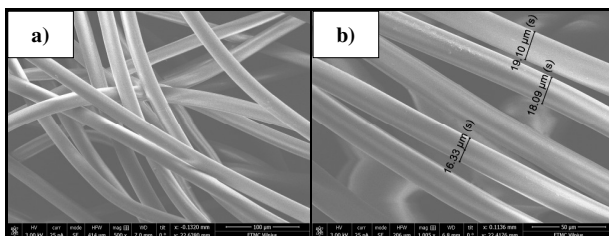
3.7 paveiksle, b parodyti chaotiškai orientuoti, tarpusavyje persipynę, PLA plaušeliai, sudarantys erdvinę struktūrą. Struktūros nuotraukose aiškiai matyti, kad pluoštinei medžiagai nebūdingas struktūros vienodumas. PLA plaušeliai dėl smulkumo sudaro didelį kiekį plaušelių susikirtimo vietų ir įvairaus dydžio ir formos oro tarpelių.

PLA mikrostruktūra pateikta 3.8 paveiksle.



3.7 pav. Suformuoto bandinio iš polilaktido pluošto makrostruktūra: a) polilaktido pluošto bendras vaizdas; b) polilaktido plaušelių išsidėstymas bandinyje

Fig. 3.7. Macrostructure of the formed specimen from polylactide fibres: a) general view of polylactide fibres b) distribution of polylactide fibres in the specimen



3.8 pav. Padidinta suformuoto bandinio iš polilaktido pluošto padidinta mikrostruktūra: a) $\times 500$; b) $\times 1\,005$

Fig. 3.8. Magnified microstructure of formed specimen from polylactide fibres: a) $\times 500$; b) $\times 1\,005$

Iš bendro PLA plaušelių vaizdo matome, kad PLA plaušelis turi vienodą formą per visą plaušo ilgį, nesimato jokių plaušo gijelių. Cheminiai pluoštai tolydžiai formuojami gijų pavidalu, todėl jų morfologinė sandara išilgai gijos yra vienoda (Mažonienė, Bendoraitienė 2008). Plaušelių skersmuo svyruoja nuo 16,33 μm iki 19,10 μm .

3.2. Medžiagų iš natūralių pluoštų šilumos laidumo tyrimai

Vienas iš pagrindinių rodiklių, kuris apibrėžia šilumos izoliavimo medžiagų struktūrą, yra tariamasis tankis*. Esant skirtingai pluoštų struktūrai, apdorojimo pobūdžiui, išsidėstymui matricoje, tačiau vienodam medžiagų tankiui, jų šilumos laidumo koeficientas gali labai skirtis.

Šiame poskyryje aprašyta įvairaus mechaninio apdorojimo natūralių pluoštų šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio.

3.2.1. Natūralių pluoštų šilumos laidumas

Eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinktos trijų rūšių medžiagos – pluoštinės kanapės, linai ir durpių pluoštas, iš kurių buvo pagaminti įvairiai apdorotų pluoštų bandiniai, siekiant palyginti šių pluoštų šilumos laidumo koeficientus, atsižvelgiant į tankius (3.1, 3.2 lentelė).

Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad matuojant suformuotų bandinių iš linų, durpių ir kanapių pluoštų šilumos laidumo koeficientus, matomas eksperimentinių duomenų nuokrypis (3.9, 3.10 ir 3.11 pav.). Kadangi linų, durpių ir kanapių pluošto bandiniai santykinai yra aktytos struktūros (3.1, 3.2 ir 3.3 pav.), šilumos perdavimas medžiagoje priklauso nuo plaušelių sienelių šilumos laidumo, dujinės fazės plaušelių viduje šilumos laidumo ir konvekcijos, taip pat ir nuo spinduliavimo tarp plaušelių sienelių. Suformuotų linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficientas yra vidutinis rodiklis, įvertinantis anksčiau išvardytus šilumos laidumo būdus.

* Pagrindinis bandinių iš natūralių pluoštų struktūrą ir savybes apibūdinantis rodiklis, netiesiogiai rodantis kietosios ir dujinės fazių santykį medžiagoje. Tariamasis tankis – tai suminis bandinių iš natūralių pluoštų matricos ir jos porose esančių dujų tankis.

3.1 lentelė. Bandinių iš linų ir durpių pluoštų tankio kitimo intervalai**Table 3.1** The intervals of changing density of specimens from flax and peat fibres

Linų ir durpių pluoštas	Tankio intervalai, kg/m ³
Durpių pluoštas ≤ 2 cm	40,2–68,6
2–3 cm ilgio šukuotas linų pluoštas	39,6–100,2
5–7 cm ilgio šukuotas linų pluoštas	39,6–101,9
Maltas linų pluoštas ≤ 2 cm	39,7–102,0
2–3 cm ilgio linų pluoštas (po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais)	39,8–100,9
5–7 cm ilgio linų pluoštas (po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais)	39,8–101,0

3.2 lentelė. Bandinių iš kanapių pluošto tankio kitimo intervalai**Table 3.2** The intervals of changing density of specimens from hemp fibres

Kanapių pluoštas	Tankio intervalai, kg/m ³
2–3 cm ilgio dekortikuotas kanapių pluoštas (be spalų)	39,6–101,1
5–7 cm ilgio dekortikuotas kanapių pluoštas (be spalų)	40,7–92,8
2–3 cm ilgio kanapių pluoštas (po mechaninio apdorojimo dantytais velenais, yra nedidelis kiekis spalų)	40,7–102,5
5–7 cm ilgio kanapių pluoštas (po mechaninio apdorojimo dantytais velenais, yra nedidelis kiekis spalų)	39,9–100,1
Ilgas, dekortikuotas kanapių pluoštas (su spaliais) ≥ 7 cm	39,9–86,8
Maltas kanapių pluoštas ≤ 2 cm	38,7–98,1
2–3 cm ilgio šukuotas kanapių pluoštas	40,0–101,5
5–7 cm ilgio šukuotas kanapių pluoštas	40,9–104,5
2–3 cm ilgio kanapių pluoštas (po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais)	40,4–102,2

Atlikti tyrimai parodė, kad linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficientas priklauso nuo medžiagos tankio ir pluoštų apdorojimo būdo (3.9, 3.10 ir 3.11 pav.). Didėjant bandinių tankiui, šilumos laidumo koeficientas mažėja, o pasiekus tam tikrą tankio lygį ir, priklausomai, koks buvo pluoštų

apdorojimo būdas, vėl pradeda didėti. Siekiant įvertinti šiuos faktorius, buvo atlikta matematinė-statistinė analizė, kuri leido spręsti ne tik apie faktorių tarpusavio ryšį, bet ir kiekybiškai įvertinti vieno dydžio pokytį pagal žinomą kito dydžio pokytį.

Atlikus eksperimentinių rezultatų matematinę-statistinę analizę, išryškėjo linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių tankio ρ , kg/m^3 , ir šilumos laidumo koeficiento $\lambda_{10^\circ\text{C}}$, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, vidutinės vertės, nustatytos pagal (3.1) regresinę lygtį, priklausomybė.

$$\bar{\lambda}_{10^\circ\text{C}} = b_0 + b_1 \cdot \rho + \frac{b_2}{\rho}, \quad (3.1)$$

čia $\bar{\lambda}_{10^\circ\text{C}}$ – vidutinė šilumos laidumo koeficiento vertė vidutinėje 10°C temperatūroje, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ρ – pluoštų bandinių tankis, kg/m^3 ; b_0 , b_1 , b_2 – pastovieji koeficientai.

Linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficiento eksperimentinių verčių statistinio apdorojimo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje. Pagal 3.1 lygtį pateikti apskaičiuotų (3.2–3.16) regresinių lygčių pastovieji koeficientai b_0, b_1, b_2 , apskaičiuoti vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai S_r , determinacijos koeficientai $\eta_{y,x}^2$ ir δ vertės prognozuojamųjų šilumos laidumo koeficiento verčių vienpusiam pasikliaujamajam intervalui nustatyti $P = 0,90$ patikimumu. Reikia pabrėžti, kad (3.2–3.16) regresinių lygčių determinacijos koeficientai svyruoja nuo 0,819 iki 0,996 ir, kai pasikliaujamumo lygmuo yra 90 %, gerokai viršija slenkstines (apatines ribines) $\eta_{y,x}^2$ vertes, apskaičiuotas pagal atitinkamas n vertes (Sachs 1976). Galima teigti, kad gautas regresines lygtis patikimai galima taikyti linų, durpių ir kanapių pluoštų šilumos laidumo vidutinėje 10°C temperatūroje koeficiento vertėms apskaičiuoti pagal žinomas tankio vertes, kurios nurodytos 3.1 ir 3.2 lentelėse.

Eksperimentinės šilumos laidumo koeficiento vertės ir atitinkamos regresijų pagal nustatytus tankius vertės pateiktos 3.9, 3.10 ir 3.11 paveiksluose.

Eksperimentinių duomenų analizė rodo (3.3 lentelėje), kad linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficiento vertės variacija ~81,9–99,6 % priklauso nuo bandinių tankio ir atitinkamai ~0,4–18,1 % – nuo kitų veiksnių. Galima teigti, kad didelį poveikį linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficientui daro medžiagos tankis. Zach *et al.* (2010) ši faktą patvirtino savo darbe gautais natūralių pluoštų tyrimų rezultatais.

3.3 lentelė. Kanapių, linų ir durpių pluoštų šilumos laidumo koeficiento nustatymo duomenų statistiniai rezultatai

Table 3.3. Statistical data results for thermal conductivity of hemp, flax and peat fibres

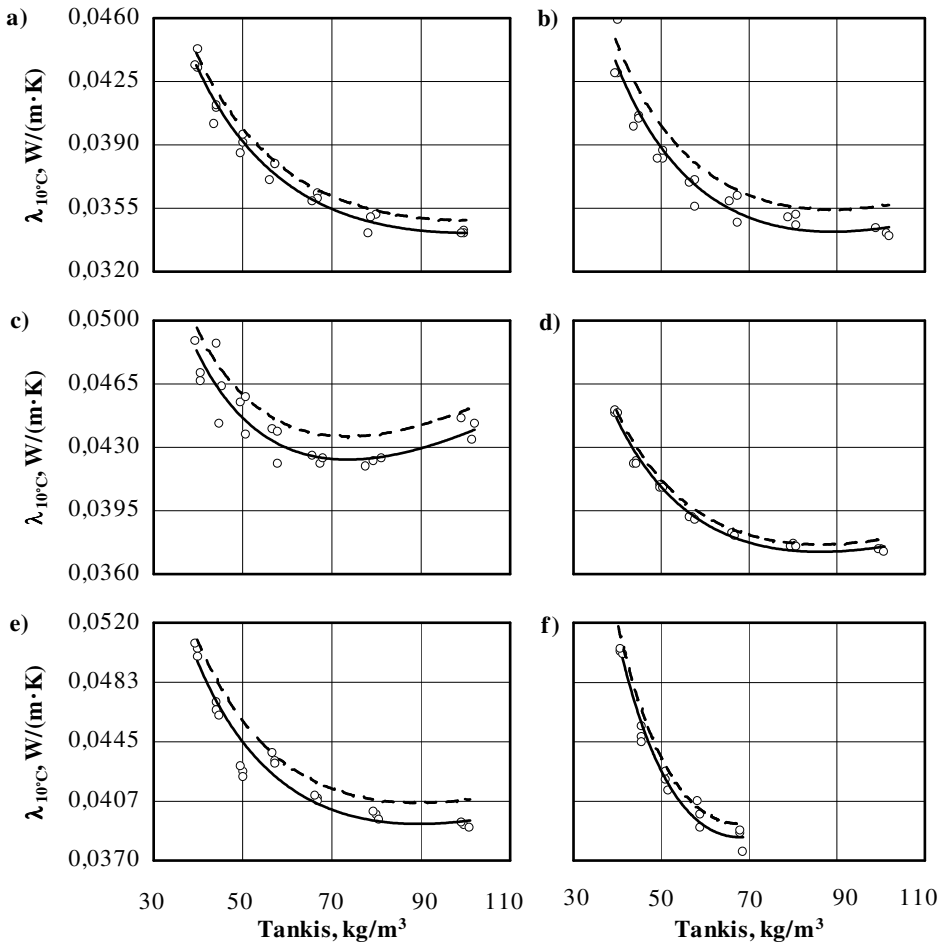
Lygties Nr.	Imtis	Pagal (3.1) lygtį apskaičiuotų (3.2)–(3.16) priklausomybių regresinių lygčių pastovieji koe- ficientai			S_r , W/(m·K)	$\eta_{y \cdot x}^2$	$\delta^* = t_\alpha \cdot S_r$, W/(m·K)
		b_0	b_1	b_2			
(3.2)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 2–3 cm ilgio šukuotas linų pluoštas						
	21	0,01437	0,000098	0,9955	0,000528	0,976	0,000699
(3.3)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 5–7 cm ilgio šukuotas linų pluoštas						
	21	0,00697	0,000153	1,2112	0,000925	0,932	0,001225
(3.4)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ maltas linų pluoštas (≤ 2 cm)						
	21	0,01172	0,000208	1,1252	0,000968	0,819	0,001282
(3.5)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 2–3 cm ilgio linų pluoštas ***						
	21	0,01361	0,00014	1,0172	0,000313	0,987	0,000414
(3.6)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 5–7 cm ilgio linų pluoštas ***						
	21	0,00962	0,000166	1,3291	0,001002	0,936	0,001326
(3.7)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ durpių pluoštas (≤ 2 cm)						
	15	-0,00914	0,000345	1,596	0,000338	0,980	0,000453
(3.8)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 2–3 cm ilgio kanapių pluoštas (dekortikuotas, be spalų)						
	21	0,01950	0,000086	1,4788	0,001090	0,969	0,001442
(3.9)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 5–7 cm ilgio kanapių pluoštas dekortikuotas, be spalų)						
	21	0,01983	0,000082	1,4542	0,000486	0,992	0,000644
(3.10)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 2–3 cm ilgio kanapių pluoštas**						
	21	0,00877	0,000149	1,6485	0,000705	0,984	0,000933
(3.11)	$\bar{\lambda}_{10^\circ C} \rightarrow \rho$ 5–7 cm ilgio kanapių pluoštas**						
	21	0,01526	0,000111	1,3162	0,000307	0,996	0,000406

3.3 lentelės pabaiga

(3.12)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ ilgasis kanapių pluoštas (dekortikuotas) (≥ 7 cm)						
	21	0,01013	0,000202	1,3655	0,000501	0,977	0,000663
(3.13)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ maltas kanapių pluoštas (≤ 2 cm)						
	21	0,01027	0,00024	1,0660	0,000518	0,918	0,000686
(3.14)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ 2–3 cm ilgio šukuotas kanapių pluoštas						
	21	0,01716	0,000079	1,2092	0,000395	0,934	0,000523
(3.15)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ 5–7 cm ilgio šukuotas kanapių pluoštas						
	21	0,01229	0,000143	1,3935	0,000712	0,972	0,000942
(3.16)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ 2–3 cm ilgio kanapių pluoštas***						
	21	0,01031	0,00014	1,4627	0,000232	0,997	0,000307

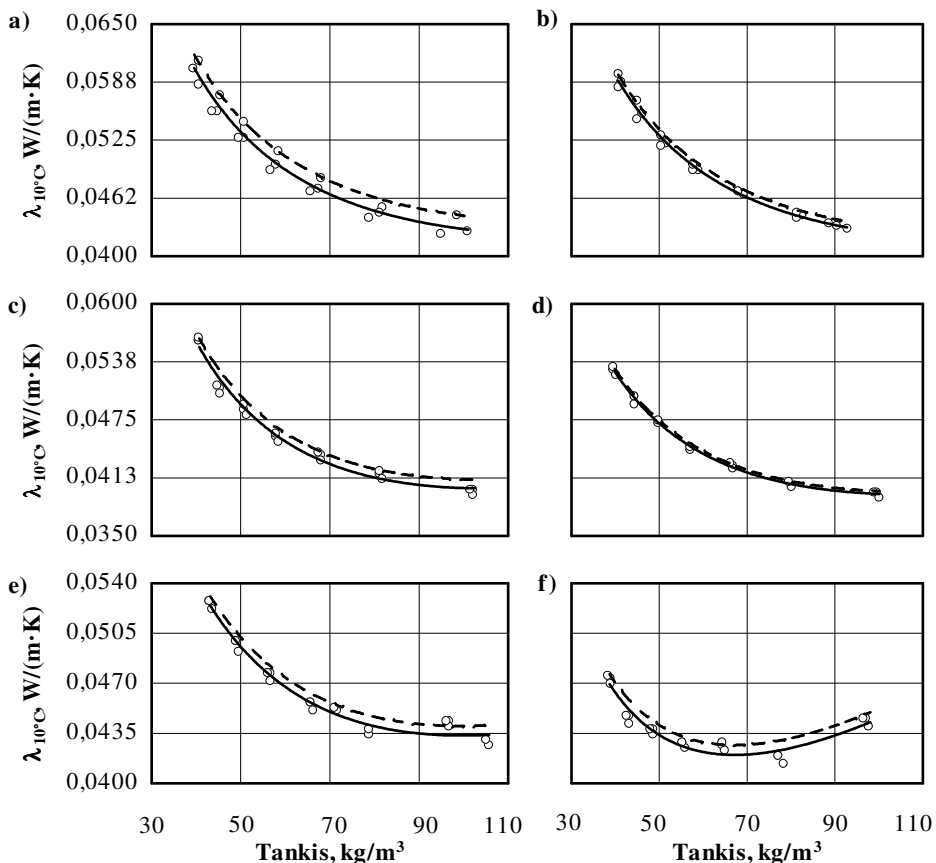
Pastaba). *)Rezultato prognozinio įverčio vienpusis pasikliaujamasis intervalas, kurio tikimybė $P = (1 - \alpha) = 0,90$, $\lambda_{10^{\circ}C}^{prog} = \bar{\lambda}_{10^{\circ}C} + \delta$. **) – po mechaninio apdorojimo dantytais velenais, esant nedideliame kiekiui spalių; ***) – po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais.

Analizuojant 3.9, 3.10 ir 3.11 paveiksluose pateiktas linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficientų verčių priklausomybes nuo tankio, matyti, kad šilumos laidumo koeficientas mažėja didėjant tankiui, pasiekus tam tikrą tankio lygį, mažai kinta, o kai kuriais atvejais net gerokai didėja. Galima daryti prielaidą, kad didėjant medžiagos tankiui, mažėja oro tarpeliai, esantys tarp plaušelių, kurie ir lemia mažesnę šilumos laidumo koeficientą, o pasiekus tam tikrą lygį, tankiui didėjant, didėja plaušelių kontaktinės zonos, kurios lemia didesnę šilumos laidumo koeficientą. Maltų linų, kanapių ir durpių pluoštų bandiniams ši riba yra $\sim 70 \text{ kg/m}^3$, o kitais būdais apdorotų linų, kanapių pluoštų bandiniams ši riba – $\sim 90 \text{ kg/m}^3$. Čekijos mokslininkų (Zach *et al.* 2010) atliktame darbe, tiriant kompozitus iš natūralių pluoštų, ši riba irgi yra $\sim 70 \text{ kg/m}^3$ – sutampa su šiame poskyryje pateiktais tyrimų rezultatais.



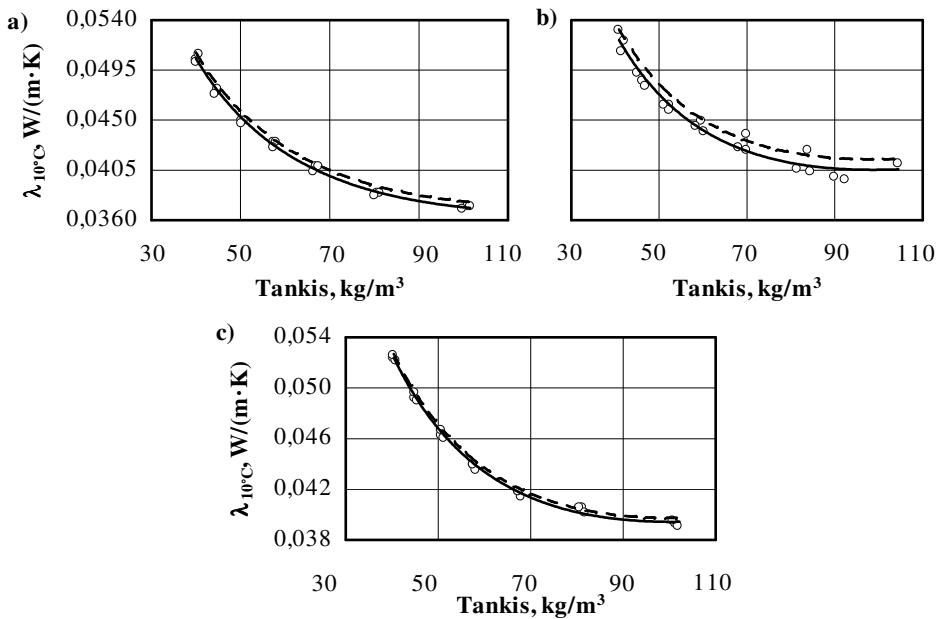
3.9 pav. Įvairaus apdorojimo linų ir durpių pluoštų šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio: a) šukuotas linų pluoštas (2–3 cm); b) šukuotas linų pluoštas (5–7 cm); c) maltas linų pluoštas; d) linų pluoštas (2–3 cm) po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais; e) linų pluoštas (5–7 cm) po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais; f) durpių pluoštas; ○ – eksperimentiniai duomenys; (—) – regresinės linijos (3.3 lentelė); (---) – prognozinės linijos (3.3 lentelė)

Fig. 3.9. Relationship between thermal conductivity and density of specimens from flax and peat fibres processed by different mechanical methods: a) combed flax fibres (2–3 cm); b) combed flax fibres (5–7 cm); c) chopped flax fibres; d) flax fibres processed mechanically by toothed shafts twice (2–3 cm); e) flax fibres processed mechanically by toothed shafts twice (5–7 cm); f) chopped peat fibres; ○ – experimental data; (—) – regression lines (Table 3.3); (---) – prediction lines (Table 3.3)



3.10 pav. Įvairaus apdorojimo kanapių pluošto šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio: a) dekortikuotas kanapių pluoštas (2–3 cm) be spalių; b) dekortikuotas kanapių pluoštas (5–7 cm) be spalių; c) kanapių pluoštas (2–3 cm) po mechaninio apdorojimo dantytais velenais esant nedideliam kiekiui spalių; d) kanapių pluoštas (5–7 cm) po mechaninio apdorojimo dantytais velenais esant nedideliam kiekiui spalių; e) ilgis dekortikuotas kanapių pluoštas su spaliais; f) maltų kanapių pluoštas; ○ – eksperimentiniai duomenys; (—) – regresinės linijos (3.3 lentelė); (- - -) – prognozės linijos (3.3 lentelė)

Fig. 3.10. Relationship between thermal conductivity and density of specimens from hemp fibres processed by different mechanical methods: a) decorticated hemp fibres (2–3 cm) without shives; b) decorticated hemp fibres (5–7 cm) without shives; c) hemp fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts once with a small amount of shives; d) hemp fibres (5–7 cm) processed mechanically by toothed shafts once with a small amount of shives; e) long decorticated hemp fibres with shives; f) chopped hemp fibres; ○ – experimental data; (—) – regression lines (Table 3.3); (- - -) – prediction lines (Table 3.3)



3.11 pav. Įvairaus apdorojimo kanapių pluošto šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio: a) šukuotas kanapių pluoštas (2–3 cm); b) šukuotas kanapių pluoštas (5–7 cm); c) kanapių pluoštas (2–3 cm) po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais; ○ – eksperimentiniai duomenys; (—) – regresinės linijos (3.3 lentelė); (---) – prognozės linijos (3.3 lentelė)

Fig. 3.11. Relationship between thermal conductivity and density of specimens from hemp fibres processed by different mechanical methods: a) combed hemp fibres (2–3 cm); b) combed hemp fibres (5–7 cm); c) hemp fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts twice; ○ – experimental data; (—) – regression lines (Table 3.3); (---) – prediction lines (Table 3.3)

Lyginant 3.9, 3.10 ir 3.11 paveiksluose pateiktas linų, durpių ir kanapių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficientų vertes, matyti, kad jos daugiau ar mažiau priklauso nuo medžiagos tankio ir pluoštų paruošimo. Šilumos laidumo koeficientų skirtumas lyginant linų pluoštų (2–3 cm), gautų po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais, ir linų pluoštų (5–7 cm), gautų po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais, esant $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ tankiui, sudarė 0,44 %, o tankiui padidėjus iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, skirtumas sudarė 0,75 %. Šilumos laidumo koeficientų skirtumas lyginant kanapių pluoštą (2–3 cm) ir kanapių pluoštą (5–7 cm) po dekortikacijos, kai bandinių tankis buvo $\sim 40 \text{ kg/m}^3$, sudarė 0,74 %, o padidėjus tankiui iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, – 0,4 %. Taigi šie skirtumai rodo, kad pluošto ilgis šilumos laidumo koeficientui įtakos neturi. Šilumos lai-

dumo koeficientų skirtumas tarp maltų ir šukuotų linų pluoštų (2–3 cm), kai bandinių tankis $\sim 40 \text{ kg/m}^3$, sudarė 11,6 %, o padidėjus tankiui iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, šilumos laidumo koeficientų skirtumas buvo 28,3 %. Šilumos laidumo koeficientų skirtumas lyginant šukuotų kanapių pluošto (2–3 cm) ir kanapių pluošto (2–3 cm), gauto po dekortikacijos, bandinius, kurių tankis buvo $\sim 40 \text{ kg/m}^3$, sudarė 18,5 %, o padidėjus tankiui iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, – 15,4 %. Šis skirtumas yra didelis dėl skirtingų pluoštų apdorojimo būdų. Skirtingai apdorotas pluoštas pasižymi plaušelių storio, porų dydžio įvairove, plaušelių susikirtimo vietomis – visa tai lemia šilumos laidumo koeficientų vertes. Palyginus šukuotų linų pluošto (2–3 cm) ir šukuotų kanapių pluošto (2–3 cm) bandinius, kurių tankis buvo $\sim 40 \text{ kg/m}^3$, jų šilumos laidumo koeficientų skirtumas sudarė 17,1 %, o tankiui padidėjus iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, – 8,9 %. Galima daryti prielaidą, kad šis šilumos laidumo koeficientų skirtumas atsirado dėl smulkesnių linų plaušelių, mažesnių oro tarpelių, kurie lemia mažesnę šilumos laidumo koeficientą.

Taip pat buvo atliktas mūsų ir kitų autorių gautų tyrimų rezultatų eksperimentinių duomenų palyginimas, kai natūralių pluoštų bandinių tankis svyravo nuo $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$. Palyginti buvo parinkti bandiniai, kurių tankis kito nuo $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, o jų šilumos laidumo koeficientų vertės kito taip: šukuotų linų pluoštų (2–3 cm) bandinių – $\sim 0,0432\text{--}0,0341 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; maltų linų pluoštų bandinių – $\sim 0,0482\text{--}0,0438 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, kanapių pluoštų (2–3 cm), du kartus mechaniškai apdorotų dantytais velenais, bandinių – $\sim 0,0599\text{--}0,0429 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, šukuotų kanapių pluoštų (2–3 cm) bandinių – $\sim 0,0506\text{--}0,0372 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Autoriai (Zach *et al.* 2010), atlikę natūralių pluoštų šilumos laidumo tyrimus, nustatė, kad kintant natūralių pluoštų bandinių tankiui nuo $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, jų šilumos laidumo koeficientai kito nuo $\sim 0,0442$ iki $0,0445 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Palyginus jų ir šiame darbe gautus eksperimentinius duomenis, nustatyta, kad $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ tankio šukuotų linų pluoštų (2–3 cm) bandinių šilumos laidumo koeficiento verčių skirtumas sudarė 2,3 %, o tankiui padidėjus iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, – 30,5 %; $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ tankio maltų linų pluoštų bandinių – 9,0 %, o tankiui padidėjus iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, – 1,6 %; $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ tankio kanapių pluošto (2–3 cm), du kartus mechaniškai apdoroto dantytais velenais, bandinių – 35,5 %, o tankiui padidėjus iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, – 3,7 %; šukuotų kanapių pluoštų (2–3 cm) bandinių, kurių tankis, $\sim 40 \text{ kg/m}^3$, – 13,7 %, o tankiui padidėjus iki $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, – 19,6 %.

Kymäläinen ir Sjöberg (2008) nustatė, kad 100 kg/m^3 tankio natūralių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficientų verčių vidurkis sudarė $\sim 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Atlikus Kymäläinen ir Sjöberg (2008) bei šio darbo eksperimentinių duomenų palyginimą, nustatyta, kad šukuotų linų pluoštų (2–3 cm) bandinių, kurių tankis – $\sim 100 \text{ kg/m}^3$, šilumos laidumo koeficientų verčių skirtumas sudaro 31,9 %; $\sim 100 \text{ kg/m}^3$ tankio maltų linų pluoštų bandinių – 2,7 %,

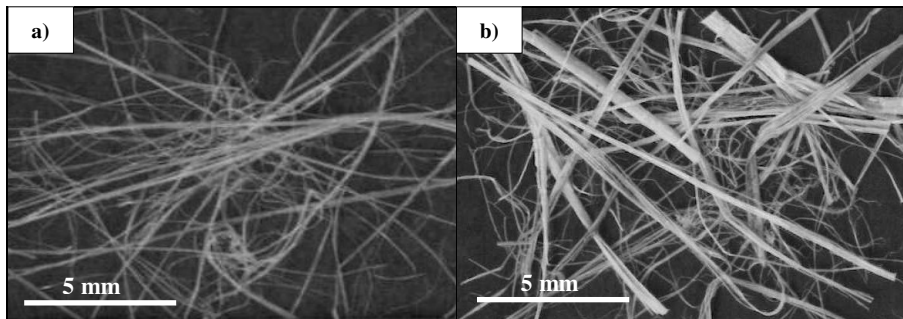
~100 kg/m³ tankio kanapių pluošto (2–3 cm), du kartus mechaniškai apdoroto dantytais velenais, bandinių sudarė 4,9 %, ~100 kg/m³ tankio šukuotų kanapių pluoštų (2–3 cm) bandinių – 20,9 %.

Freivalde ir Kukle (2012) taip pat atliko natūralių pluoštų bandinių tyrimus, o palyginus jų ir šio darbo eksperimentinius duomenis, buvo nustatyta, kad šukuotų linų pluoštų (2–3 cm) bandinių, kurių tankis – ~100 kg/m³, šilumos laidumo koeficiento skirtumas sudarė 8,5 %; maltų linų pluoštų bandinių – 18,4 %; kanapių pluoštų (2–3 cm), du kartus mechaniškai apdorotų dantytais velenais, bandinių – 15,9 %, šukuotų kanapių pluoštų (2–3 cm) bandinių – 0,5 %, kai tankis atitinkamai buvo ~100 kg/m³.

Palyginus šio darbo ir kitų užsienio autorių tyrimų rezultatus, matyti, kad šilumos laidumo koeficientų verčių skirtumų kitimo ribos yra plačios – nuo 1,6 % iki 35,5 %. Šie dideli skirtumai atsiranda dėl skirtingo pluoštų apdorojimo būdo – skirtingai apdorojus žaliavą, kinta tolygaus žaliavų išdėstymo bandinyje galimybės. Mūsų gautos šilumos laidumo koeficiento vertės yra mažesnės už kitų mokslininkų gautas natūralių pluoštų šilumos laidumo koeficiento vertes.

Norint parinkti tinkamą variantą medžiagos šilumos laidumo koeficiento ir tankio požiūriu, reikia taikyti optimalų pluoštų apdorojimo būdą. Šukuotų natūralių pluoštų bandinių šilumos laidumo koeficientų vertės yra geriausios. Tai lemia šukuotų kanapių pluoštų struktūrą. Gailius ir Vėjelis (2010) teigia, kad oras yra geriausias izoliatorius, kadangi šilumos srautas, stengdamasis jį apeiti, keičia kryptį ir ieškodamas mažiausio pasipriešinimo, skverbiasi po kietąją fazės dalimi (plaušeliu). Kuo mažesnis plaušelio storis, porų dydis, ir kuo smulkesnės plaušelių susikirtimo vietos, tuo geriau izoliuojama šiluma. 3.12 paveiksle, a galima matyti, kad šukuotų kanapių plaušeliai pasižymi mažu storiu, kuris kinta nuo 20 μm iki 140 μm. Plaušelių storiai nustatyti pasinaudojant kompiuterine vaizdo apdorojimo ir analizės programa ImageTool. Su smulkiais plaušeliais galima suformuoti optimalią struktūrą, lemiančią geras šilumines savybes. Tačiau toks natūralių pluoštų apdorojimas, kaip šukavimas, technologiniu požiūriu reikalauja daug darbo sąnaudų ir lemia gana didelius žaliavos (pluoštų) nuostolius (žr. 2.1 poskyrį, 2.1 lentelę).

Norint natūralius pluoštus panaudoti efektyvioms šilumos izoliavimo medžiagoms gaminti, tikslinga gaminti trumpus natūralius pluoštus, du kartus mechaniškai apdorotus dantytais velenais. Šių apdorotų kanapių pluoštų šilumos laidumo koeficientų verčių rezultatai yra šiek tiek blogesni negu šukuotų pluoštų bandinių, tačiau skirtumas nedidelis. Makrostruktūros tyrimai rodo (3.12 b pav.), kad smulkintų kanapių bandinių plaušelių storis yra labai nevienodas, jis kinta nuo 40 μm iki 450 μm. Tai lemia dvikartinis kanapių pluoštų mechaninis apdorojimas dantytais velenais – vieni plaušeliai išsisluoksniuoja, sutrupa į smulkesnes daleles, kiti plaušeliai lieka nepakitę. Skirtingų storių plaušeliai suformuoja įvairaus dydžio oro tarpelius.



3.12 pav. Skirtingai apdorotų kanapių pluoštų makrostruktūra: a) šukuotų kanapių pluoštų (2–3 cm); b) kanapių pluoštų (2–3 cm) po dvikartinio mechaninio apdorojimo dantytais velenais

Fig. 3.12. Macrostructure of differently treated hemp fibres: a) combed hemp fibres (2–3 cm); b) hemp fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts twice

Tolesniems tyrimams pasirinktas trumpasis (2–3 cm) kanapių pluoštas, du kartus mechaniškai apdorotas dantytais velenais, kadangi iš tokio pat kiekio žaliavų, kanapių pluošto gaunama daugiau negu linų pluošto.

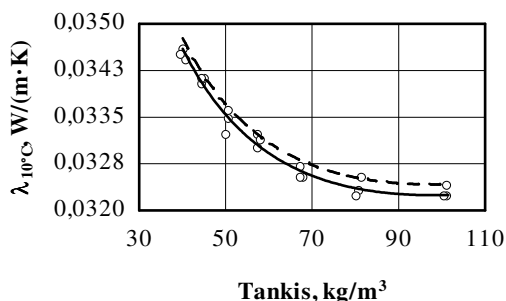
3.2.2. Polilaktido pluošto šilumos laidumas

Prieš atliekant termoizoliacinio kompozito tyrimus, buvo nustatytas ir PLA šilumos laidumo koeficientas. Šį pluoštą numatyta naudoti kaip rišiklį, su kuriuo bus formuojama kompozito struktūra, lemianti mažą šilumos laidumo koeficientą.

Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad PLA šilumos laidumo koeficiento vertės gali būti aprašytos pagal (3.17) lygtį. Eksperimentinės PLA pluošto šilumos laidumo koeficiento vertės ir atitinkamos regresijų pagal nustatytus tančius vertės pateiktos 3.13 paveiksle ir aprašytos empirine lygtimi:

$$\bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}} = 0,02671 + 0,000028 \cdot \rho + \frac{0,27072}{\rho}. \quad (3.17)$$

Vidutinis kvadratinis nuokrypis $S_r = 0,000130 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ($n = 21$, determinacijos koeficientas $\eta^2 = 0,9779$). Taip pat gali būti apskaičiuotas rezultato prognozinio įverčio vienpusis pasikliaujamasis intervalas, kurio tikimybė $P = (1 - \alpha) = 0,90$, $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}^{\text{prog}} = \bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}} + \delta$, kai $n = 21$ ir $t_{\alpha} = 1,32$, yra $\delta = t_{\alpha} \cdot S_r = 0,000172$ (3.13 pav. punktyrinė linija).



3.13 pav. Bandinių iš polilaktido pluošto šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio: ○ – eksperimentiniai duomenys; (—) – regresinė linija (3.17 lygtis); (- - -) – prognozė linija

Fig. 3.13. The dependence of thermal conductivity on density of specimens from polylactide fibres; ○ – experimental data; (—) – regression line (3.17 equation); (- - -) – prediction line

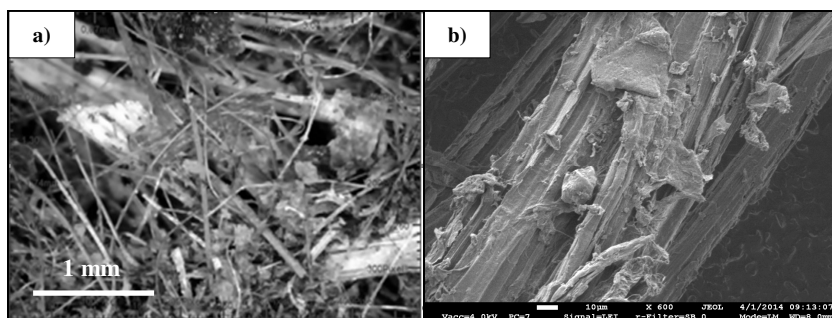
Taip pat buvo palyginti PLA šilumos laidumo koeficientai ir natūralių pluoštų atitinkami koeficientai (3.2 ir 3.17 lygtys). Palyginimas parodė, kad PLA šilumos laidumo koeficiento vertės, esant 40 kg/m³, yra 25 % mažesnės už natūralių pluoštų šilumos laidumo koeficientų vertes. Padidinus tankį iki 90 kg/m³, šilumos laidumo koeficientų verčių skirtumas sudarė 6,3 %. Kadangi PLA rišiklis bus naudojamas kompozito gamybai, galima teigti, kad PLA turės teigiamą poveikį viso kompozito šilumos laidumo koeficiento vertei.

3.3. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir durpių pluošto rišiklio, savybių eksperimentiniai tyrimai

Šiame poskyryje pateikiami struktūriniai kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto durpių pluošto rišiklio, eksperimentiniai tyrimai.

3.3.1. Kompozito su durpių pluošto rišikliu struktūra

3.14 paveiksle pateikta kompozito iš kanapių ir durpių pluošto makro- ir mikrostruktūros vaizdai. 3.14 paveiksle, a matyti, kad pluoštai kompozite yra išsidėstę chaotiškai, persipynę tarpusavyje. Taip pat vyrauja daug smulkių organinių dalelių, kurios yra prilipusios prie kanapių plaušelių (3.14 b pav.).



3.14 pav. Padidinta kompozito iš natūralių pluoštų makro- ir mikrostruktūra:
a) $\times 80$; b) $\times 600$

Fig. 3.14. Magnified macro- and microstructures of composite from natural fibres:
a) $\times 80$; b) $\times 600$

Tarppluoštinių ryšių zonos susidaro aplipus smulkioms organinėms dalelėms, kurios $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje suformuoja efektingų jungčių zonas tarp atskirų plaušelių, tačiau neįsigeria į plaušus. Tokios „standžios jungtys“ suteikia kompozitui didesnę mechaninę stiprumą.

3.3.2. Kompozito su durpių pluošto rišikliu šilumos laidumas

Šilumos laidumo tyrimams buvo suformuoti ir pagaminti kanapių ir durpių pluošto kompozitai, kurių tankis svyravo nuo $\sim 173\text{ kg/m}^3$ iki 186 kg/m^3 , atitinkamai šilumos laidumo koeficientas kito nuo $0,0436\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ iki $0,0481\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad kompozito tankiui padidėjus apie $7,5\%$, šilumos laidumo koeficientas padidėjo $10,3\%$. Galima teigti, kad kanapių ir durpių pluošto kompozito šilumos laidumo koeficientas tiesiogiai priklauso nuo medžiagos struktūros ir tankio.

Širšinėnaitienė ir Puodžiukynas (1995) tyrė termoizoliacines medžiagas iš durpių pluoštų ir nustatė, kad šilumos laidumo koeficientas gali kisti nuo $0,055\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ iki $0,085\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Korjakinis *et al.* (2013) tyrė kanapių ir durpių pluošto termoizoliacinius kompozitus, kurių tankis – $\sim 240\text{ kg/m}^3$, ir nustatė, kad šilumos laidumo koeficiento ribos yra $0,056\text{--}0,060\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Palyginus mūsų ir kitų mokslininkų gautų tyrimų rezultatus, galima teigti, kad kompozitas iš kanapių ir durpių pluoštų gali būti naudojamas kaip efektyvi termoizoliacinė medžiaga atitvarinėms konstrukcijoms. Tačiau norint pagaminti tokią termoizoliacinę medžiagą, reikia didelių laiko, darbo ir energijos sąnaudų. Norint sumažinti minėtas sąnaudas, kurios reikalingos kompozitui išdžiovinti po pluoštų aktyvavimo vandeniu, turėtų būti naudojami technologiniai procesai,

kurie veiksmingai pašalintų vandens perteklių, pavyzdžiui, vakuumavimo technologija.

3.4. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir polilaktido pluošto rišiklio, savybių eksperimentiniai tyrimai

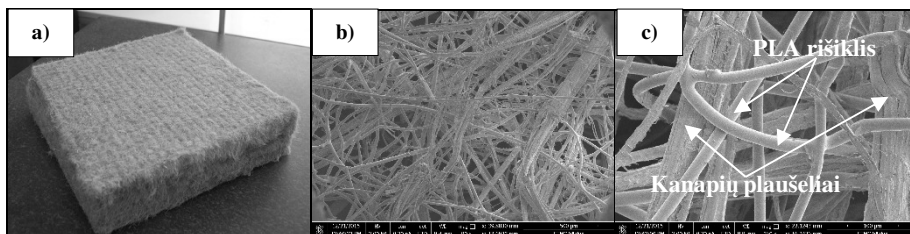
Tolesniems tyrimams kompozito formavimui buvo parinktas kitas efektyvus rišiklis – PLA, kuris yra biologiškai skaidus. Taip pat šis pluoštas yra termiškai apdorojamas 130 °C temperatūroje 15–20 min.

3.4.1. Kompozito su polilaktido pluošto rišikliu struktūra

Šiame poskyryje aprašyti kompozito iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio makro- ir mikrostruktūros tyrimai. Pluoštinio kompozito makro- ir mikrostruktūros nuotraukos pateiktos 3.15 ir 3.16 paveiksluose.

Atliekant kompozito makrostruktūros susidarymo tyrimus, nustatyta, kad šios medžiagos struktūrą sudaro du struktūriniai lygmenys:

1. Kanapių pluoštas kompozite sudaro pluoštinio karkaso struktūrą (3.15 b pav.).
2. PLA kompozite sudaro vadinamąją tinklinę struktūrą, kuri tarpusavyje susijungusi jungtimis (3.15 c pav.)

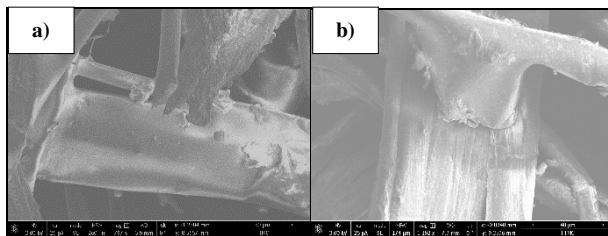


3.15 pav. Padidinta kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir polilaktido pluošto rišiklio, makrostruktūra: a) bendras pluoštinio kompozito vaizdas; b) bendras kompozito plaušelių išsidėstymo bandinyje vaizdas ($\times 80$); c) bendras kompozito plaušelių išsidėstymo bandinyje vaizdas ($\times 350$)

Fig. 3.15. Magnified macrostructure of composite made from hemp fibres and polylactide fibres: a) general view of fibrous composite; b) general view of composite's fibres distribution in specimen ($\times 80$); c) general view of composite's fibres distribution in specimen ($\times 350$)

Chaotiškas pluoštų išsidėstymas yra būdingas pluošto struktūros pavidalas, norint nustatyti pirmąjį pluoštinio kompozito makrostruktūros lygmenį. Struktūriškai pluoštinis kompozitas gali būti apibūdinamas kaip erdvinė sistema, sudaryta iš daugybės tam tikra tvarka vienas kito atžvilgiu išsidėsčiusių ir susipynusių plaušų. PLA, kadangi yra smulkus ir turi tinklinę struktūrą, užpildo didžiąją kompozito tūrio dalį.

Kompozitą tiriant mikroskopiniu lygiu (3.16 pav.), aiškiai matomi plaušeliai, kontaktai tarp plaušų, dulkių tarpai. 3.16 paveiksle matyti, kad kanapių ir PLA plaušelių paviršiaus ypatumai yra skirtingi. Taip pat mikrostruktūros tyrimai parodė, kad terminio apdorojimo metu PLA lydosi ir prisiklijuoja prie kanapių plaušelių paviršiaus.



3.16 pav. Padidinta pluoštinio kompozito mikrostruktūra: a) kanapių plaušelio sukibimas su polilaktido plaušeliu ($\times 797$); b) kanapių plaušelio sukibimas su polilaktido plaušeliu ($\times 1192$);

Fig. 3.16. Magnified microstructure of fibrous composite: a) adhesion of hemp fibres and polylactide fibre ($\times 797$); b) adhesion of hemp and polylactide fibre ($\times 1192$)

Atlikti makro- ir mikrostruktūros tyrimai leidžia daryti prielaidą, kad būtent pluoštinių medžiagų struktūros formavimo ypatumai nulemia kompozito fizikines ir mechanines savybes. Ohmura *et al.* (2002) teigia, kad pavieniai elementarieji plaušai, jų erdvinės orientacijos gaminio tūryje pobūdis lemia termoizoliacinių medžiagų struktūrą ir pagrindines gaminių savybes: tankį, stiprį, šilumos laidumą.

3.4.2. Kompozito mechaninių rodiklių tyrimai veikiant trumpalaikėmis apkrovomis

Atlikta literatūros analizė parodė, kad natūralaus pluošto kompozitus, kaip ir daugelį termoizoliacinių medžiagų, veikiant gniuždymo, tempimo apkrova, jų mechaniniai rodikliai labai skiriasi, tai priklauso nuo medžiagos tankio, plaušelių orientacijos, struktūros, technologinių parametrų ir kt.

Būdinga daugelio termoizoliacinių medžiagų savybė yra fizikinių ir mechaninių charakteristikų (gniuždymo stipris, tempimo stipris ir t. t.) priklausomybė

nuo medžiagos tankio. Šios savybės yra labai svarbios, nes pagal jas parenkama, ar medžiaga bus konstrukcinė termoizoliacinė, ar termoizoliacinė.

3.4.2.1. Kompozito gniuždymo tyrimai ir pluoštų orientacijos poveikio gniuždymo stipriui įvertinimas

Kaip ir daugelio pluoštinių termoizoliacinių medžiagų, nustatant pluoštinio kompozito bandinių gniuždymo stiprį, ryškaus ribinio stiprio neužfiksuojama. Todėl šis rodiklis įvertinamas labai paprastai – nustatant termoizoliacinių medžiagų sąlyginį įtempį, atitinkantį 10 % deformaciją pagal bandinio storį (LST EN 826).

Priklausomybės tarp kintamųjų – tankio ir stipruminių bei deformacinių savybių – buvo nustatomos pagal tiesinę priklausomybę:

$$\bar{Y}_x = b_0 + b_1 \cdot X, \quad (3.18)$$

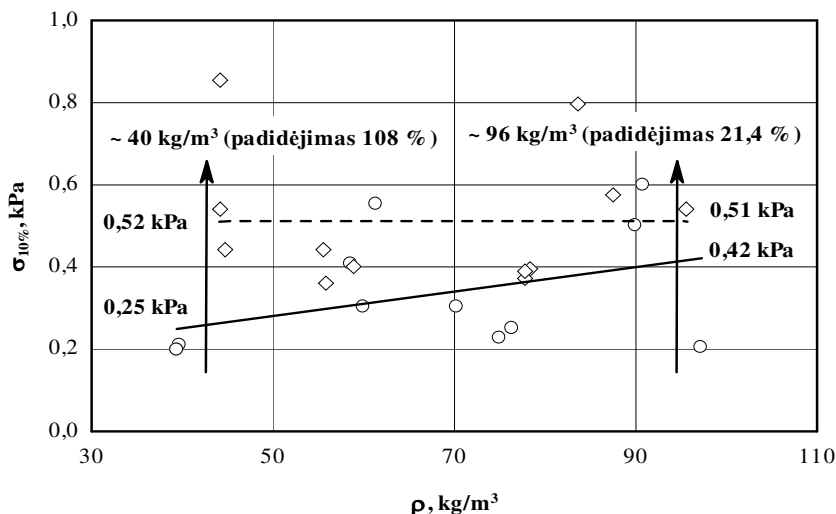
čia \bar{Y}_x – įvertinamo parametro vidutinė vertė; X – kintamasis arba nustatomasis parametras tankis; b_0, b_1 – pastovieji koeficientai.

3.17 paveiksle pateikti bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio bei kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, eksperimentinių gniuždymo duomenų analizės rezultatai. Pateiktus pluoštinių bandinių eksperimentinių duomenų sąryšius tarp gniuždymo įtempių ir bandinių tankių galima išreikšti regresinėmis lygtimis, kurios nurodytos 3.4 lentelėje. Matome, kad nagrinėjame tankių $\rho_{(11\%PLA)}$ ir $\rho_{(15\%PLA)}$ intervale nuo pradžios iki pabaigos ryšiai yra nereikšminiai, nelemiantys gniuždymo įtempių pokyčių.

3.4 lentelė. Pluoštinio kompozito gniuždymo įtempio nustatymo duomenų statistiniai rezultatai

Table 3.4. Statistical data results for compressive stress of fibrous composite

Lygties Nr.	Imtis	Pagal (3.18) lygtį apskaičiuotų (3.19) ir (3.20) priklausomybių regresinių lygčių pastovieji koef.		S_r , kPa	$\eta_{y \cdot x}^2$
		b_0	b_1		
(3.19)	$\sigma_{10\%} \rightarrow$, esant 11 % PLA rišiklio				
	12	0,132	0,00297	0,141	0,169
(3.20)	$\sigma_{10\%} \rightarrow$, esant 15 % PLA rišiklio				
	12	0,528	-0,000259	0,173	0,00083



3.17 pav. Pluoštinių bandinių gniuždymo įtempio, $\sigma_{10\%}$, sąryšis su tankiu:

(—) – bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 11 % polilaktido pluošto rišiklio;

(---) – bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 15 % polilaktido pluošto rišiklio

Fig. 3.17. The dependence of compressive stress, $\sigma_{10\%}$, on density of fibrous specimens:

(—) – specimens from hemp fibres and 11 % of polylactide fibres binder;

(---) – specimens from hemp fibres and 15 % of polylactide fibres binder

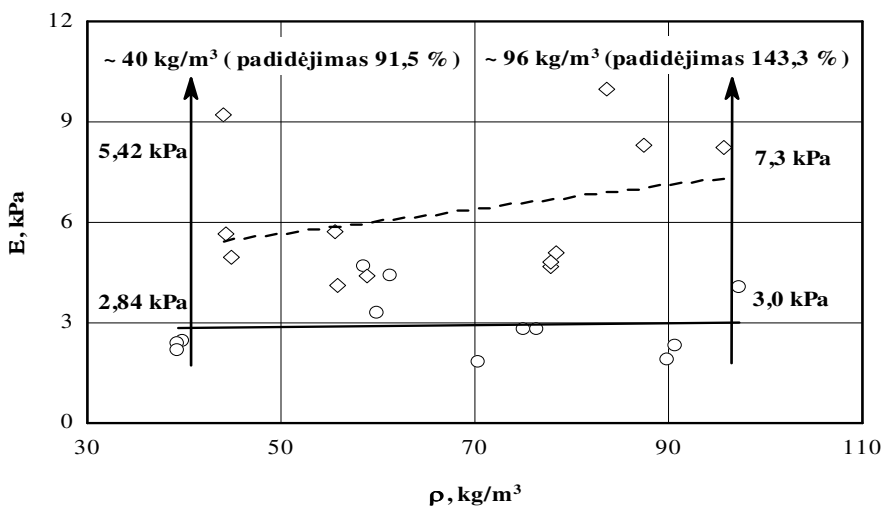
Atlikti gniuždymo įtempio bandymai parodė, kad pluoštinių bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, tankiui kintant nuo $\sim 39,4$ kg/m³ iki $97,3$ kg/m³, gniuždymo įtempis $\sigma_{10\%}$ kito nuo $\sim 0,25$ kPa iki $0,42$ kPa, taigi gniuždymo įtempio padidėjimas sudarė 68 %. Pluoštinių bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, gniuždymo stiprio bandymai parodė, kad kintant tankiui nuo $\sim 44,1$ kg/m³ iki $95,7$ kg/m³, gniuždymo įtempis $\sigma_{10\%}$ kito nuo $\sim 0,52$ kPa iki $0,51$ kPa, taigi gniuždymo įtempio sumažėjimas atitinkamai sudarė 1,96 %. Gniuždymo įtempių skirtumas lyginant bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, ir bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, esant ~ 40 kg/m³ tankiui, sudarė 108 %. Gniuždymo įtempio skirtumas lyginant bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 11 % bei 15 % PLA rišiklio, esant ~ 96 kg/m³ tankiui, sudarė 21,4 %.

Pagal eksperimentinius duomenis buvo įvertinti sąryšiai tarp tamprumo modulio ir bandinių tankių $\rho_{(11\%PLA)}$ ir $\rho_{(15\%PLA)}$, kurie yra išreikšti lygtimis (3.5 lentelė; 3.18 pav.). Matyti, kad nagrinėjamame tankių $\rho_{(11\%PLA)}$ ir $\rho_{(15\%PLA)}$ intervale nuo pradžios iki pabaigos ryšiai yra nereikšminiai ir nelemiantys tamprumo modulį gniuždant pokyčių.

3.5 lentelė. Pluoštinio kompozito pradinio tamprumo modulio nustatymo duomenų statistiniai rezultatai

Table 3.5. Statistical data results for modulus of elasticity of fibrous composite

Lygties Nr.	Imtis	Pagal (3.18) lygtį apskaičiuotų (3.21) ir (3.22) priklausomybių regresinių lygčių pastovieji koeficientai		S_r , kPa	$\eta_{y \cdot x}^2$
		b_0	b_1		
(3.21)	$\bar{E} \rightarrow \rho$, esant 11 % PLA rišiklio				
	12	2,73	0,00299	1,02	0,0389
(3.22)	$\bar{E} \rightarrow \rho$, esant 15 % PLA rišiklio				
	12	3,83	0,0363	2,06	0,104



3.18 pav. Pluoštinių bandinių tamprumo modulio, E , priklausomybė nuo tankio:

(—) – bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 11 % polilaktido pluošto rišiklio;

(---) – bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 15 % polilaktido pluošto rišiklio

Fig. 3.18. The dependence of modulus of elasticity, E , on density of fibrous specimens:

(—) – specimens from hemp fibres and 11 % of polylactide fibres binder;

(---) – specimens from hemp fibres and 15 % polylactide fibres binder

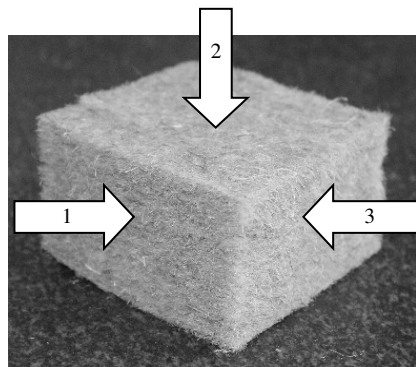
Atlikti tyrimai parodė, kad pluoštinių bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, tankiui kintant nuo $\sim 39,4 \text{ kg/m}^3$ iki $\sim 97,3 \text{ kg/m}^3$, tamprumo modulis E kito nuo $\sim 2,84 \text{ kPa}$ iki $3,0 \text{ kPa}$. Atitinkamas tamprumo modulio gniuždant padidėjimas sudarė $5,63 \%$. Pluoštinių bandinių, sudarytų iš kanapių

pluošto ir 15 % PLA rišiklio, tamprumo modulio gniuždant bandymai parodė, kad tankiui kintant nuo $\sim 44,1 \text{ kg/m}^3$ iki $\sim 95,7 \text{ kg/m}^3$, tamprumo modulis E kito nuo $\sim 5,42 \text{ kPa}$ iki $7,3 \text{ kPa}$. Tamprumo modulio gniuždant padidėjimas sudarė 34,7 %.

Tamprumo modulio gniuždant skirtumas lyginant bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, bei bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, esant $\sim 40 \text{ kg/m}^3$ tankiui, sudarė 91,5 %, o tankiui padidėjus iki $\sim 96 \text{ kg/m}^3$, skirtumas buvo 143,3 %.

Eksperimentinių gniuždymo stiprio duomenų analizė parodė, kad tikslinga gaminti bandinius iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio. Padidinus PLA pluošto rišiklio kiekį nuo 11 % iki 15 %, bandinių gniuždymo įtempis ir tamprumo modulis padidėjo apie du kartus. Taip pat reikia pažymėti, kad padidinus pluoštinių bandinių, sudarytų iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, tankį apie du kartus, t. y. nuo $\sim 44,1 \text{ kg/m}^3$ iki $95,7 \text{ kg/m}^3$, atsiranda tik nedidelis gniuždymo įtempio padidėjimas, todėl racionalu gaminti $\sim 40\text{--}50 \text{ kg/m}^3$ tankio demblius iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio.

Kaip buvo minėta antrajame skyriuje, pluoštų klodai kompozite pagal gamybos technologiją priskiriami horizontalios pluošto orientacijos struktūrai. Taip pat atlikta literatūros analizė parodė, kad pluoštinių medžiagų savybės įvairiomis kryptimis yra nevienodos (Buska 2010) – jos priklauso nuo dominuojančios pluoštų krypties. Todėl buvo įvertintas pluoštinio kompozito gniuždymo stipris visomis apkrovos veikimo kryptimis (3.19 pav.).

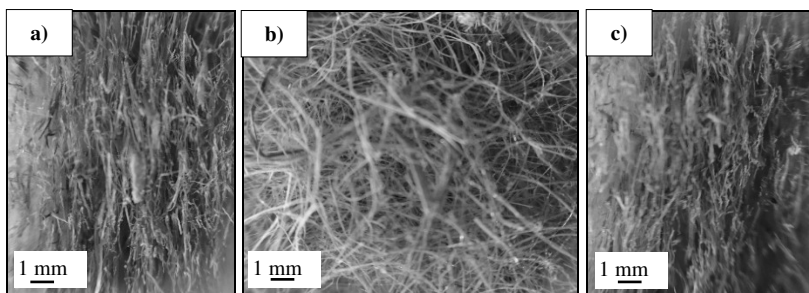


3.19 pav. Gniuždymo apkrovos kryptys: 1 – išilgai formavimo krypties; 2 – statmenai formavimo kryptčiai; 3 – skersai formavimo krypties

Fig. 3.19. The compressive load direction of: 1 – parallel to the forming direction; 2 – perpendicular to the forming direction; 3 – across to the forming direction

Eksperimentiniams tyrimams buvo naudoti kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % bei 15 % PLA rišiklio, bandiniai, kurių tankis yra $\sim 40 \text{ kg/m}^3$.

3.20 paveiksle parodytas kanapių ir PLA pluoštų klodų išsidėstymas bandinyje, atsižvelgiant į formavimo kryptį. 3.20 a ir 3.20 c paveikslėliuose matyti, kad išilgai ir skersai formavimo kryptių klodai yra išsidėstę tolygiais sluoksniais, sudarydami tolygią ir vientisą struktūrą, o 3.20 paveiksle, b matome, kad pluoštų išsidėstymas statmenai formavimo kryptčiai yra chaotiškas.

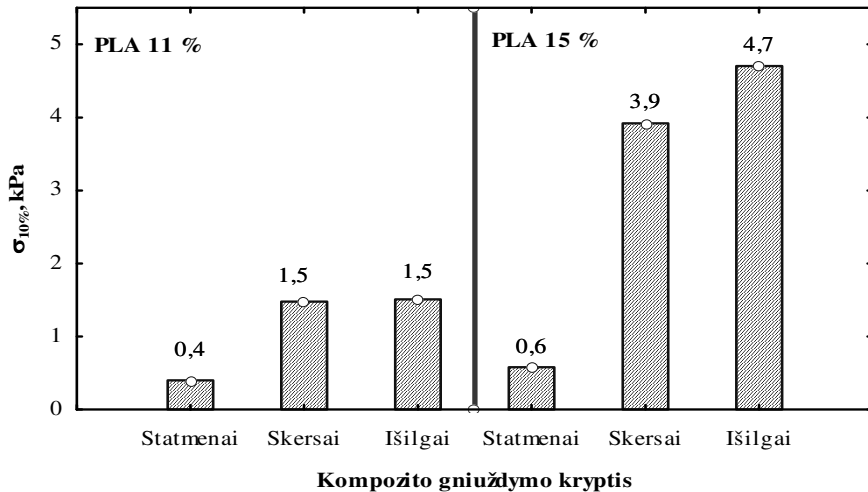


3.20 pav. Pluoštinio kompozito klodų orientacija ($\times 40$): a – išilgai formavimo krypties; b – statmenai formavimo kryptčiai; c – skersai formavimo krypties

Fig. 3.20. The orientation of fibrous composite layers ($\times 40$): a – parallel to the forming direction; b – perpendicular to the forming direction; c – across to the forming direction

Atlikta pluoštinio kompozito eksperimentinių duomenų analizė parodė, kad bandinių pluoštų orientacija turi didelį poveikį gniuždymo stipriui. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, gniuždymo tyrimai parodė (3.21 pav.), kad gniuždamas statmenai formavimo kryptčiai gniuždymo įtempio vidutinė vertė sudaro 0,402 kPa, gniuždamas skersai formavimo krypties – 1,48 kPa ir gniuždamas išilgai formavimo krypties – 1,51 kPa. Matome, kad pluoštinio kompozito gniuždymo įtempio verčių skirtumas lyginant bandinius, kurie gniuždomi skersai formavimo krypties ir išilgai formavimo krypties, yra nedidelis – sudaro ~1,02 karto. Gniuždymo įtempio skirtumas lyginant bandinius, kurie gniuždomi statmenai formavimo kryptčiai, ir bandinius, gniuždomus skersai ir išilgai formavimo krypties, sudaro ~3,8 karto.

Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, gniuždymo tyrimai parodė (3.21 pav.), kad gniuždymo įtempio vidutinės vertės gniuždamas statmenai, skersai ir išilgai formavimo krypties buvo atitinkamai 0,58 kPa, 3,92 kPa ir 4,70 kPa. Matome, kad pluoštinio kompozito gniuždymo įtempio verčių skirtumas lyginant bandinius, gniuždomus skersai formavimo krypties ir išilgai formavimo kryptčių, yra nedidelis – sudaro ~1,2 karto. Gniuždymo įtempio skirtumas lyginant bandinius, kurie gniuždomi statmenai formavimo kryptčiai, ir bandinius, kurie gniuždomi skersai ir išilgai formavimo krypties, sudarė ~8,1 karto.



3.21 pav. Pluoštinio kompozito apkrovos veikimo krypties poveikis gniuždymo stipriui
Fig. 3.21. The impact of compressive load direction towards fibres orientation on compressive stress of fibrous composite

Kadangi bandiniai yra gniuždomi iki 10 % santykinės deformacijos, o pluoštai klode išsidėstę horizontalia formavimo kryptimi, tai gniuždam bandinius statmenai formavimo kryptčiai, bandinyje nevyksta struktūros suirtis. Gniuždam palaipsniui, medžiaga tik sutankėja – sumažėja oro tarpeliai, o plaušeliai pasislenka tuščios erdvės link. Todėl gniuždymo stiprio vertės gniuždam statmenai formavimo kryptčiai yra mažiausios. Gniuždymo stiprio vertės skersai formavimo kryptties šiek tiek didesnės dėl dominuojančių pluoštų išsidėstymo kurios nors kryptties atžvilgiu. Bandinyje pluoštai yra išsidėstę chaotiškai, tačiau gniuždam skersai formavimo kryptties, bandinyje atsiranda daugiau kryptingai orientuotų pluoštų, kurie sutampa su gniuždymo kryptimi. Tada vyksta didesnis pasipriešinimas, kurį sustiprina PLA tinklinė struktūra. Gniuždymo stiprio vertės išilgai formavimo kryptties yra didžiausios, kadangi gniuždam bandinyje atsiranda didžiausias kiekis kryptingai orientuotų pluoštų, sutampančių su gniuždymo kryptimi.

Gniuždymo įtempio verčių skirtumas lyginant kompozito bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio bei kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, kurie gniuždomi skersai formavimo kryptties, ir bandinius, kurie gniuždomi išilgai formavimo kryptties, sudaro ~3,1 karto. Gniuždymo įtempio padidėjimą lemia ne tik bandinių formavimo kryptis, bet ir rišiklio kiekis, jo pasiskirstymo tolygumas visame gaminio tūryje, sukibimo su kanapių plaušeliais

stipris. Kuo didesnis yra rišiklio ir plaušelių lietimosi taškų skaičius, tuo didesnis gaminio stiprumas.

3.4.2.2. Kompozito tempimo tyrimai

Kaip ir daugelio pluoštinių gaminių, tempimo stipris yra svarbi savybė transportuojant, montuojant. Gaminys laikomas tinkamu naudoti atitvarinėse konstrukcijose, jei atlaiko tempimo apkrovą, dvigubai didesnę nei gaminio masę.

Eksperimentiniams tyrimams buvo naudoti pluoštinio kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % bei 15 % PLA rišiklio, bandiniai, kurių tankis buvo $\sim 40 \text{ kg/m}^3$.

Eksperimentinių duomenų analizė parodė, kad klodų orientacija turi didelį poveikį ir tempimo stipriui. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, tempimo stiprio vidutinė vertė statmenai formavimo kryptčiai sudarė 0,5 kPa, skersai formavimo kryptties – 28,9 kPa ir išilgai formavimo kryptties – 17,0 kPa (3.22 pav.). Tempimo stiprio verčių skirtumai yra dideli. Tempimo stiprio verčių skirtumas tempiant statmenai formavimo kryptčiai ir skersai formavimo kryptties sudarė $\sim 57,8$ karto, o tempimo stiprio skirtumas tempiant skersai formavimo kryptties ir išilgai formavimo kryptties sudarė $\sim 1,7$ karto.

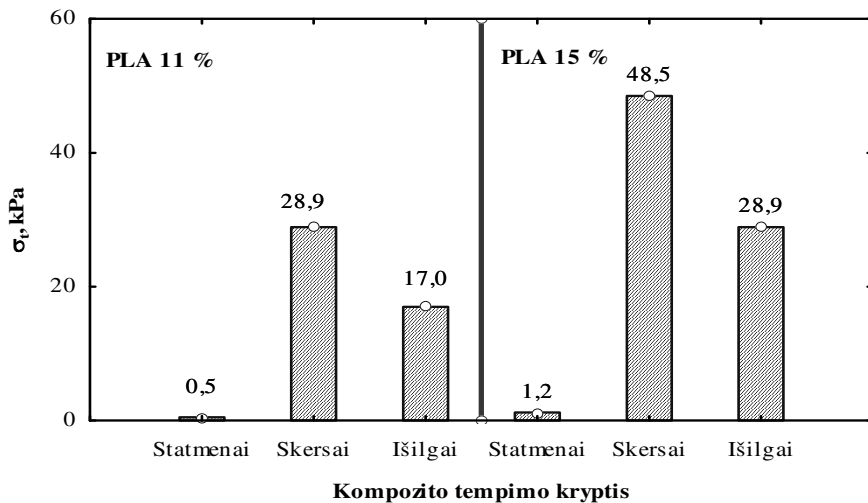
Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, tempimo stiprio tyrimai parodė (3.22 pav.), kad tempimo stiprio vidutinė vertė tempiant statmenai formavimo kryptčiai sudarė 1,2 kPa, skersai formavimo kryptties – 48,5 kPa ir išilgai formavimo kryptties – 27,2 kPa. Tempimo stiprio vertės tempiant statmenai formavimo kryptčiai ir skersai formavimo kryptties skyrėsi $\sim 40,4$ karto. Tempimo stiprio vertės skersai formavimo kryptties ir išilgai formavimo kryptties skyrėsi $\sim 1,8$ karto.

Palyginus pluoštinio kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio bei kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, bandinių bandymų rezultatus, nustatyta:

1. Tempimo stipris statmenai formavimo kryptčiai padidėjo $\sim 2,4$ karto.
2. Tempimo stipris skersai formavimo kryptties padidėjo $\sim 1,8$ karto.
3. Tempimo stipris išilgai formavimo kryptties padidėjo $\sim 1,6$ karto.

Padidinus pluoštinio kompozito PLA rišiklio kiekį nuo 11 % iki 15 %, tempimo stipris tempiant visomis kryptimis padidėjo apie 2,0 kartus.

Galima daryti prielaidą, kad pluoštinio kompozito tempimo stipris priklauso nuo rišiklio kiekio ir jo pasiskirstymo struktūroje tolygumo, tačiau didžiausią įtaką tempimo stipriui daro plaušelių orientacija gaminyje – gaminio formavimo ypatumas.



3.22 pav. Pluoštinio kompozito formavimo krypties poveikis tempimo stipriui
Fig. 3.22. The impact of tensile load direction towards fibres orientation on tensile strength of fibrous composite

Tempimo stiprio vertės tempiant statmenai formavimo kryptčiai yra mažiausios dėl silpnų kontaktinių zonų tarp klodų PLA rišiklio susilydymo kontaktinėse zonose. Tempimo stiprio vertės išilgai ir skersai formavimo krypties padidėja dėl pluoštų kryptingos orientacijos ir PLA rišiklio sukibimo su kanapių plaušeliais tarpusavyje. Tempimo stiprio vertės tempiant išilgai formavimo krypties, palyginus su tempimo vertėmis tempiant skersai formavimo krypties, yra mažesnės. Tempiant išilgai formavimo krypties, bandinyje vyrauja didelis kiekis kryptingai orientuotų kanapių plaušelių PLA rišiklio tinkle, sutampančių su tempimo kryptimi, dėl kurių vyksta mažesnis pasipriešinimas. Bandinį tempiant kanapių plaušeliai yra ištempiami iš PLA rišiklio tinklo, o pasiekus tam tikrą ribinę vertę, nutrūksta PLA rišiklio kontaktinėse sukibimo zonose. Tempimo stiprio vertės tempiant skersai formavimo krypties yra didžiausios, kadangi tempiant bandinyje vyrauja didesnis kiekis kanapių plaušelių, orientuotų skersai ir įsipyusių į PLA rišiklio tinklą, bei mažesnis kiekis kanapių plaušelių, sutampančių su tempimo jėga. Tempiant bandinį didžiausią pasipriešinimą sudaro skersai orientuoti plaušeliai. Tempiant bandinį palaipsniui, kanapių plaušeliai išsitraukia iš PLA rišiklio tinklo, o pasiekus ribinę vertę, bandinys suyra per PLA rišiklio kontaktines zonas.

Reguliuojant kanapių plaušų išsidėstymo struktūroje kryptingumą ir PLA rišiklio kiekį, galima gaminti numatytų stiprumo savybių gaminius. Šis procesas

reikalauja tam tikrų technologinių formavimo ypatumų, kuriuos taikant būtų galima formuoti gaminius, numatant plaušų kryptingą išsidėstymą.

3.4.3. Kompozito šilumos laidumo koeficiento nustatymas

Vienas iš esminių pastato reikalavimų yra energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas. Todėl norint taupyti ir išsaugoti šilumą pastato viduje, reikia naudoti kuo efektyvesnes šilumos izoliavimo medžiagas. Vienas iš svarbesnių kriterijų, nusakančių efektyvias termoizoliacines medžiagas, yra šilumos laidumo koeficientas – kuo šis dydis yra mažesnis, tuo efektyvesnė termoizoliacinė medžiaga.

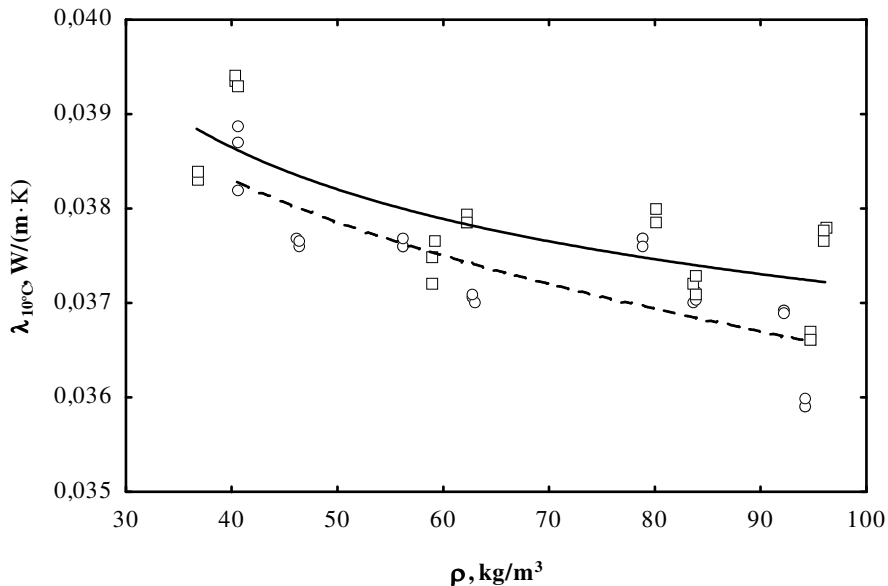
Šilumos laidumo koeficiento nustatymo tyrimams atlikti buvo suformuoti ir pagaminti pluoštiniai kompozitai iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio bei kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, kurių tankis svyravo nuo $\sim 36,8 \text{ kg/m}^3$ iki $96,1 \text{ kg/m}^3$.

Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, šilumos laidumo tyrimai parodė (3.23 pav.), kad, esant medžiagos tankiui 40 kg/m^3 , šilumos laidumo koeficientas yra $0,0386 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Padidinus pluoštinio kompozito tankį iki 90 kg/m^3 , šilumos laidumo koeficientas sudarė $0,0373 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Taigi, padidinus kompozito tankį $\sim 2,25$ karto, šilumos laidumo koeficientas sumažėjo $\sim 1,03$ karto. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, šilumos laidumo tyrimai parodė, kad, esant medžiagos tankiui 40 kg/m^3 , šilumos laidumo koeficientas sudarė $0,0383 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Padidinus pluoštinio kompozito tankį iki 90 kg/m^3 , šilumos laidumo koeficientas sudarė $0,0367 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Taigi, padidinus kompozito tankį $\sim 2,25$ karto, šilumos laidumo koeficientas sumažėjo $\sim 1,04$ karto.

Kaip matome iš 3.23 paveikslą, pluoštinio kompozito šilumos laidumo koeficiento mažėjimo tendencijos yra panašios ir esant 11 %, ir esant 15 % PLA rišiklio. Palyginus pluoštinio kompozito bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, ir bandinius, sudarytus iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, esant medžiagos tankiui 40 kg/m^3 , buvo nustatyta, kad šilumos laidumo koeficiento vertės sumažėjo $\sim 1,01$ karto; medžiagos tankį padidinus iki 90 kg/m^3 , šilumos laidumo koeficiento vertės sumažėjo $\sim 1,02$ karto. Galima teigti, kad rišiklio kiekio poveikis šilumos laidumo koeficientui yra nedidelis.

Šilumos laidumo koeficientų verčių skirtumas lyginant smulkintų 2–3 cm ilgio kanapių pluoštų bandinius ir kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, bandinius, esant 40 kg/m^3 tankiui, sudarė 28 %, o padidėjus tankiui iki 90 kg/m^3 , skirtumas sudarė 0,5 %. Šilumos laidumo koeficientų verčių skirtumas lyginant smulkintų 2–3 cm ilgio kanapių pluoštų bandinius ir kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, bandinius, esant 40 kg/m^3 tankiui, sudarė 29 %, o padidėjus tankiui iki 90 kg/m^3 , skirtumas suda-

rė 2 %. Taigi, galima daryti prielaidą, kad PLA rišiklis pagerina viso kompozito šilumines savybes.



3.23 pav. Pluoštinio kompozito šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio:

□ – eksperimentiniai duomenys (11 % polilaktido pluošto rišiklio); ○ – eksperimentiniai duomenys (15 % polilaktido pluošto rišiklio); (—) – vidutinės vertės pagal (3.23) regresinę lygtį; (---) – vidutinės vertės pagal (3.24) regresinę lygtį (3.6 lentelė)

Fig. 3.23. The dependence of thermal conductivity on density of fibrous composite:

□ – experimental data (11 % of polylactide fibres binder); ○ – experimental data (15 % of polylactide fibres binder); (—) – average values according to regression equation (3.23); (---) – average values according to regression equation (3.24) (Table 3.6)

Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad pluoštinio kompozito šilumos laidumo koeficientas gali būti aprašytas pagal (3.1) lygtį. Eksperimentinės pluoštinio kompozito, esant skirtingam PLA rišiklio kiekiui, šilumos laidumo koeficiento vertės ir atitinkamos regresijų pagal nustatytus tankius vertės pateiktos 3.23 paveiksle ir aprašytos empirinėmis lygtimis, nurodytomis 3.6 lentelėje.

Ekperimentinių duomenų statistinė analizė (žr. 3.6 lentelę) parodė, kad kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, šilumos laidumo koeficiento pokyčiai 57,9 % priklauso nuo medžiagos tankio ir 42,1 % nuo kitų veiksnių. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, šilumos laidumo koeficiento pokyčiai 65,0 % priklauso nuo medžiagos tankio ir 35,0 % – nuo kitų veiksnių.

3.6 lentelė. Pluoštinio kompozito šilumos laidumo koeficiento nustatymo duomenų statistiniai rezultatai

Table 3.6. Statistical data results for thermal conductivity of fibrous composite

Lygties Nr.	Imtis	Pagal (3.1) apskaičiuotų (3.23) ir (3.24) priklausomybių regresinių lygčių pastovieji koef.			S_r , W/(m·K)	$\eta_{y,x}^2$
		b_0	b_1	b_2		
(3.23)	24	0,0368	-0,000005	0,0797	0,000528	0,579
(3.24)	24	0,0375	-0,000016	0,0581	0,000461	0,650

Atlikta literatūros analizė parodė, kad vienas iš galimų veiksnių, darančių poveikį šilumos laidumo koeficientui, yra gaminio storis (Bessonova, Zhiharev 2007). Todėl šiame darbe buvo pabandyta įvertinti pluoštinio kompozito šilumos laidumo koeficiento priklausomybę ne tik nuo medžiagos tankio, bet ir nuo storio.

3.24 paveiksle pateiktos kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % bei 15 % PLA rišiklio, bandinių šilumos laidumo koeficientų priklausomybės nuo medžiagos tankio ir storio. Pluoštinio kompozito bandinių tankis kito nuo ~36,8 kg/m³ iki 96,1 kg/m³, o bandinių storis – nuo ~50 mm iki 100 mm.

Pluoštinio kompozito tankio ir storio įtaką šilumos laidumo koeficientui galima išreikšti regresine lygtimi (3.24 pav., 3.7 lentelė):

$$\bar{\lambda}_{10^\circ C} = b_0 + b_1 \cdot \rho + b_2 \cdot d + b_3 \cdot \rho^2 + b_4 \cdot d^2, \quad (3.25)$$

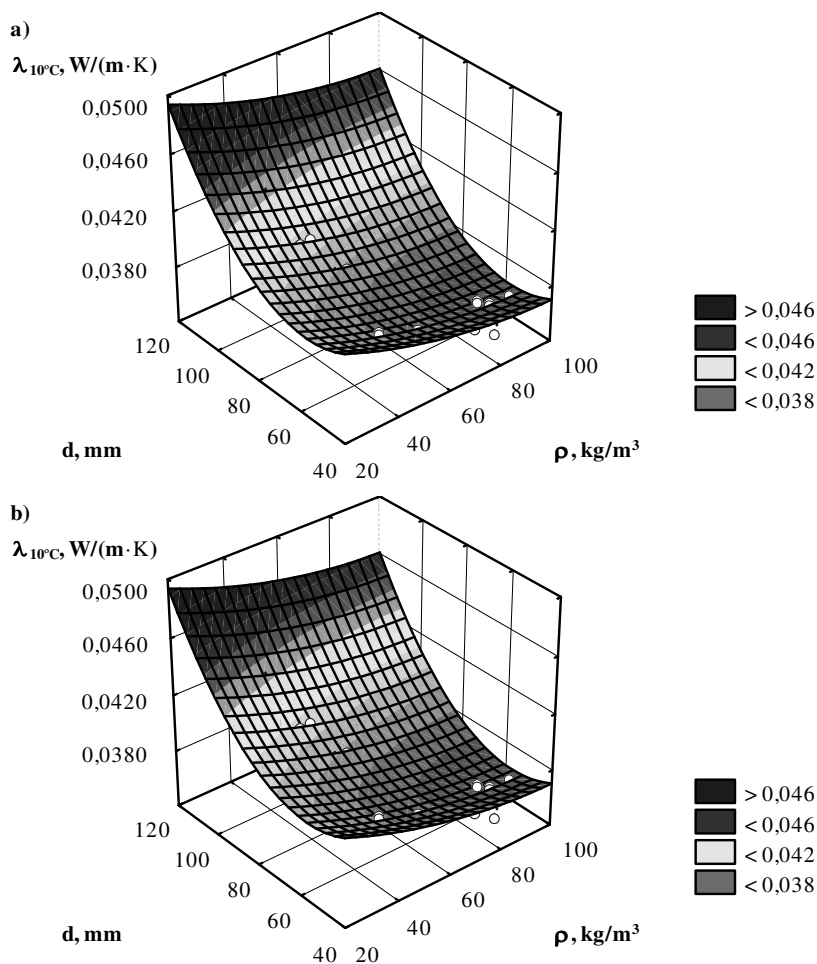
čia $\bar{\lambda}_{10^\circ C}$ – vidutinė šilumos laidumo koeficiento vertė, esant vidutinei 10 °C temperatūrai, W/(m·K); ρ – kompozito tankis, kg/m³; d – bandinio storis, mm; b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 – pastovieji koeficientai.

3.7 lentelė. Pluoštinio kompozito šilumos laidumo koeficiento nustatymo duomenų statistiniai rezultatai pagal (3.25) regresinę lygtį

Table 3.7. Statistical data results for thermal conductivity of fibrous composite according to regression equation (3.25)

Lygties Nr.	Imtis	Pagal (3.25) lygtį apskaičiuotų (3.26) ir (3.27) priklausomybių regresinių lygčių pastovieji koef.					S_r , W/(m·K)	$\eta_{y,x}^2$
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_4		
(3.26)	36	$4,97 \cdot 10^{-2}$	$-9,8 \cdot 10^{-5}$	$-2,9 \cdot 10^{-4}$	$4,72 \cdot 10^{-7}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$	0,899
(3.27)	36	$5,04 \cdot 10^{-2}$	$-7,7 \cdot 10^{-5}$	$-3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,77 \cdot 10^{-7}$	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$4,94 \cdot 10^{-4}$	0,935

Ekperimentinių duomenų statistinė analizė (žr. 3.7 lentelę) parodė, kad kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio, šilumos laidumo koeficiento pokyčiai 89,9 % priklauso nuo medžiagos tankio ir storio, ir 10,1 % – nuo kitų veiksnių. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, šilumos laidumo koeficiento pokyčiai 93,5 % priklauso nuo medžiagos tankio ir storio ir tik 6,5 % – nuo kitų veiksnių.



3.24 pav. Pluoštinio kompozito šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio ir storio pagal: a) (3.26) regresinę lygtį (11 % polilaktido pluošto rišiklio); b) (3.27) regresinę lygtį (15 % polilaktido pluošto rišiklio) (žr. 3.7 lentelę)

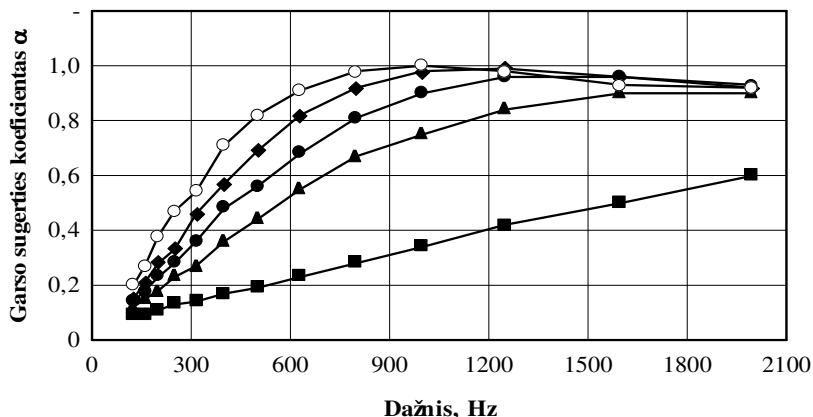
Fig. 3.24. The dependence of thermal conductivity of fibrous composite on density and thickness according to: a) regression equation (3.26) (11 % of polylactide fibres binder); b) regression equation (3.27) (15 % of polylactide fibres binder) (see Table 3.7)

Atlikti stipruminių ir šiluminių savybių tyrimai parodė, kad geriausi rezultatai gaunami kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio atveju. Todėl tolesniems tyrimams buvo naudojamas šios sudėties kompozitas.

3.4.4. Kompozito garso sugerties koeficiento nustatymas

Norint patikrinti galimybę efektyviau naudoti pluoštinį kompozitą atitvarinėse konstrukcijose ne tik kaip šilumos izoliavimo medžiagą, bet ir kaip akustinę medžiagą, buvo atliktas garso sugerties koeficiento nustatymas.

Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15% PLA rišiklio, garso sugerties koeficiento eksperimentiniai duomenys pateikti 3.8 lentelėje ir 3.25 paveiksle. Bandymai buvo atlikti su bandiniais, kurių storis sudarė 50 mm, o tankis svyravo nuo 20 kg/m^3 iki 100 kg/m^3 .



3.25 pav. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % polilaktido pluošto rišiklio, garso sugerties koeficiento kinetika (tankis, kg/m^3 , ■ – 20; ▲ – 40; ● – 60; ◆ – 80; ○ – 100)

Fig. 3.25. Kinetics of sound absorption coefficient of the composite made from hemp fibres and 15 % of polylactide fibres as a binder (density, kg/m^3 , ■ – 20; ▲ – 40; ● – 60; ◆ – 80; ○ – 100)

Pluoštinio kompozito garso sugerties koeficientas buvo nustatomas esant dažniui nuo 125 Hz iki 2000 Hz (3.25 pav.), tačiau 3.8 lentelėje pateikti tik keturių dažnių diapazono (250, 500, 1000 ir 2000 Hz) rezultatai, pagal kuriuos nustatomas suvidurkintas NRC (*Noise reduction coefficient*) – triukšmo mažinimo koeficientas (Berardi, Iannace 2015; Asdrubali 2007), kuris taikomas įvairioms medžiagoms palyginti.

3.8 lentelė. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % polilaktido pluošto rišiklio, garso sugerties koeficiento kitimas, esant skirtingiems tankiams

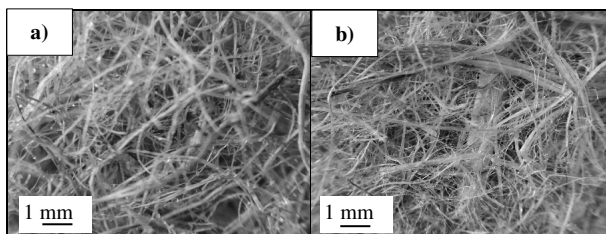
Table 3.8. The change in sound absorption coefficient of different densities having composite from hemp fibres and 15 % of polylactide fibres as a binder

Tankis, kg/m ³	Bandinio storis, mm	Garso bangų dažnis, Hz				NRC
		250	500	1000	2000	
		Garso sugerties koeficientas				
20	50	0,11	0,17	0,34	0,60	0,35
40		0,18	0,36	0,75	0,90	0,60
60		0,23	0,48	0,90	0,93	0,70
80		0,28	0,57	0,98	0,92	0,75
100		0,38	0,71	1,00	0,92	0,70

Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė (3.25 pav.), kad 20 kg/m³ tankio pluoštinio kompozito garso sugerties koeficientas, didėjant dažniui, didėja tiesiškai. Kai medžiagos tankis kinta nuo 40 kg/m³ iki 100 kg/m³, pasireiškia staigus garso sugerties koeficiento augimas, kuris tęsiasi iki ~1000 Hz. Toliau garso dažniui didėjant nuo 1000 Hz iki 2000 Hz, garso sugerties koeficiento kitimas išlieka nedidelis.

Pluoštų ir pluoštinių kompozitų garso sugerties koeficientas priklauso nuo daugelio veiksnių: medžiagos tankio, storio, struktūros, porų didumo, pluoštų orientacijos ir kt. (Berardi, Iannace 2015; Xiang *et al.* 2013; Beghi 2013).

Pluoštinio kompozito struktūros tyrimai parodė (3.26 pav.), kad 20 kg/m³ tankio bandinyje yra stambesni oro tarpeliai, kuriems esant garso sklidimas tokiame kompozite dėl mažesnės trinties juda lengviau, – todėl garso sugerties koeficientas yra mažesnis. Didėjant medžiagos tankiui nuo 40 kg/m³ iki 100 kg/m³, oro tarpai mažėja, todėl sklisdama medžiagoje garso banga praranda daugiau garso energijos ir padidėja garso sugerties koeficientas.



3.26 pav. Skirtingo tankio pluoštinio kompozito bendras vaizdas: a) – 20 kg/m³, b) – 100 kg/m³

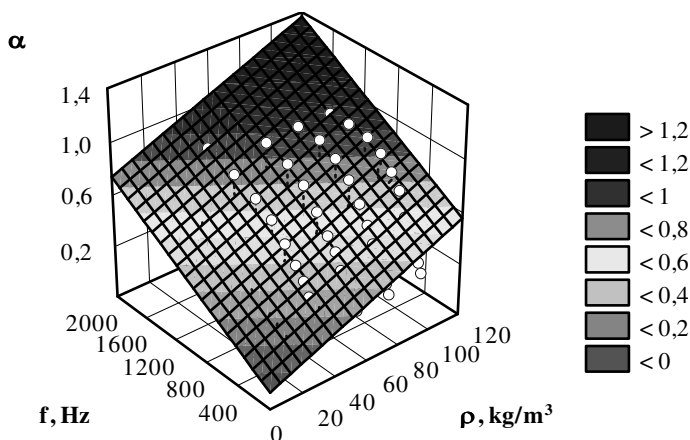
Fig. 3.26. General view of fibre composite with different densities: a) – 20 kg/m³, b) – 100 kg/m³

3.8 lentelėje pateikti suvidurkinti kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, triukšmo mažinimo koeficientai, kurie svyravo nuo 0,35 iki 0,75, kompozito tankiui kintant nuo 20 kg/m^3 iki 100 kg/m^3 . Šios eksperimentinių suvidurkintų triukšmo mažinimo koeficientų vertės buvo palygintos su kitų užsienio autorių gautais tyrimų rezultatais. Berardi, Iannace (2015) nustatė, kad kanapių pluoštų bandinių, kurių tankis 50 kg/m^3 , triukšmo mažinimo koeficientas buvo lygus 0,4, o mūsų gauta šio koeficiento vertė – apie 1,6 karto didesnė. Asdrubali (2007) atlikti kanapių pluošto akustiniai tyrimai parodė, kad esant bandinio tankiui 50 kg/m^3 , triukšmo mažinimo koeficientas lygus 0,75. Mūsų nustatyta vertė buvo mažesnė apie 1,15 karto. Garso sugerties koeficiento verčių padidėjimą ir sumažėjimą gali lemti parinkti skirtingi pluoštų apdorojimo technologiniai parametrai.

Remiantis 3.25 paveiksle pateiktais rezultatais, buvo pabandyta įvertinti tankio ir dažnio įtaką pluoštinio kompozito garso sugerties koeficientui α . Visa tai buvo aprašyta daugialype regresijos lygtimi:

$$\alpha = b_0 + b_1 \cdot \rho + b_2 \cdot f, \quad (3.28)$$

čia α – garso sugerties koeficientas; ρ – kompozito tankis, kg/m^3 ; f – sklidimo dažnis, Hz; $b_0 = -0,0699$, $b_1 = 0,00522$, $b_2 = 0,000405$ – lygties pastovieji koeficientai. Vidutinis kvadratinis nuokrypis $S_r = 0,154$ ir determinacijos koeficientas $\eta_\alpha^2 = 0,768$. Regresinės lygties grafinė interpretacija pateikta 3.27 paveiksle.



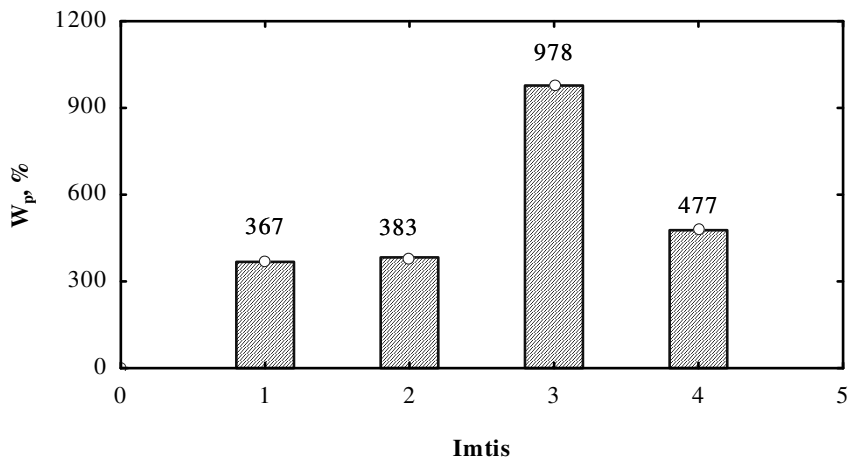
3.27 pav. Pluoštinio kompozito garso sugerties koeficiento priklausomybės nuo tankio ir dažnio regresinės lygties (3.28) grafinė interpretacija

Fig. 3.27. The graphical interpretation of the regression line (3.28) for sound absorption coefficient dependence on density and frequency of fibrous composite

3.4.5. Kompozito vandens sugerties tyrimai

Naudojant termoizoliacines medžiagas statybinėse konstrukcijose (sienose, stoguose, grindyse ir t. t.) gali pasireikšti vandens poveikis termoizoliaciniam sluoksniui, kuris gali pabloginti jo fizikines ir mechanines savybes, todėl būtina, kad termoizoliacinė medžiaga būtų gana atspari drėgmės poveikiui.

Prieš nustatant pluoštinio kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, trumpalaikę vandens sugertį, buvo tiriama kanapių ir PLA pluoštų, išdžiovintų (23 ± 2) °C temperatūros ir (50 ± 5) % santykinio oro drėgnio aplinkoje ir išlaikytų 130 °C temperatūroje 20 min., trumpalaikė vandens sugertis pagal masę (3.28 pav.).



3.28 pav. Kanapių ir polilaktido pluoštų vandens sugerties pokyčiai: 1 – kanapių pluoštas, išdžiovintas normaliomis laboratorinėmis sąlygomis; 2 – kanapių pluoštas, išdžiovintas 130 °C temperatūroje; 3 – polilaktido pluoštas, išdžiovintas normaliomis laboratorinėmis sąlygomis; 4 – polilaktido pluoštas, išdžiovintas 130 °C temperatūroje

Fig. 3.28. The changes in water absorption of hemp and polylactide fibres: 1 – hemp fibres dried under normal laboratory conditions; 2 – hemp fibres dried at 130 °C temperature; 3 – polylactide fibres dried under normal laboratory conditions; 4 – polylactide fibres dried at 130 °C temperature

Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad kanapių pluošto, išdžiovinto normaliomis laboratorinėmis sąlygomis, ir kanapių pluošto, išdžiovinto 130 °C temperatūroje, vandens sugerties skirtumo pokytis yra nedidelis. PLA, išdžiovinto normaliomis laboratorinėmis sąlygomis, ir PLA, išdžiovinto 130 °C tempera-

tūroje, vandens sugerties skirtumas yra didelis – 130 °C temperatūroje išdžiovinoto PLA vandens sugertis sumažėjo ~2 kartus.

Galima teigti, kad terminio apdorojimo poveikis kanapių pluošto vandens sugerčiai yra nestiprus, kadangi neįvyko jokių struktūros pokyčių. Terminio apdorojimo poveikis PLA vandens sugerčiai yra didelis, kadangi 130 °C temperatūroje pluoštas išsilydo – susidaro vientisa plėvelė, nebelieka jokių tuščių tarp tarp plaušelių. Tai ir lemia vandens sugerties sumažėjimą.

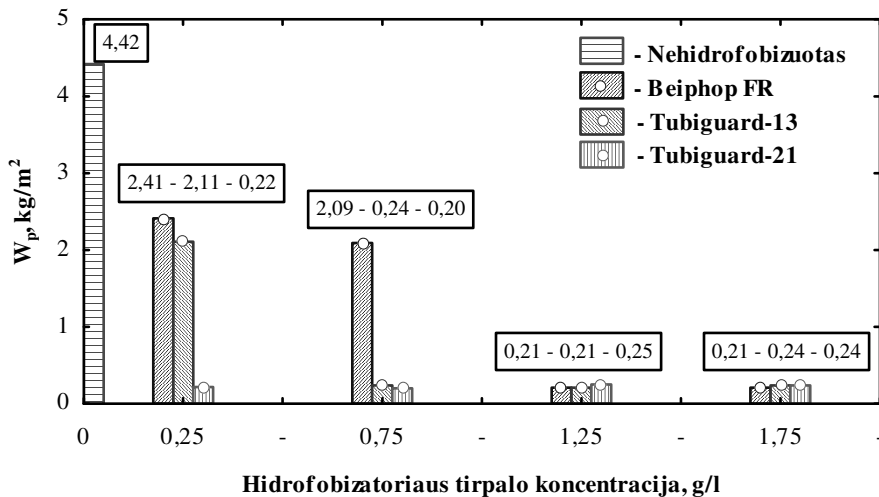
3.4.5.1. Hidrofobizatoriaus parinkimas kompozitui

Norint nustatyti tinkamiausią priedą kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, vandens sugerčiai mažinti, buvo pasirinkti trijų rūšių skirtingų koncentracijų vandenį atstumiantys priedai (žr. 2.3.5 poskyrį 2.3 lentelę).

3.29 paveiksle parodytas hidrofobinių priedų ir jų tirpalų koncentracijos poveikis pluoštinio kompozito trumpalaikiai vandens sugerčiai. Kaip atskaitos taškas (3.29 pav.) pateiktas hidrofobinio poveikio neturintis pluoštinis kompozitas, kurio trumpalaikė vandens sugertis yra 4,42 kg/m² arba 249,1 % pagal masę.

Apdorojus kompozitą 0,25 g/l vandens atstūmimo priedu, trumpalaikė vandens sugertis sumažėjo: naudojant Beiphob FR hidrofobizatorių – ~1,8 karto; Tubiguard 13 – ~2,1 karto; Tubiguard 21 – ~20,1 karto. Apdorojus kompozitą 0,75 g/l vandens atstūmimo priedu, trumpalaikė vandens sugertis sumažėjo: naudojant Beiphob FR – ~2,1 karto; Tubiguard 13 – ~18,4 karto; Tubiguard 21 – ~22,1 karto. Apdorojus kompozitą 1,25 g/l vandens atstūmimo priedu, trumpalaikė vandens sugertis sumažėjo: naudojant Beiphob FR – ~21,0 karto; Tubiguard 13 – ~21,0 karto; Tubiguard 21 – ~17,7 karto. Apdorojus kompozitą 1,75 g/l vandens atstūmimo priedu, trumpalaikė vandens sugertis sumažėjo: naudojant Beiphob FR – ~21,0 karto; Tubiguard 13 – ~18,4 karto; Tubiguard 21 – ~18,4 karto.

Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad jau įterpus 0,25 g/l vandens atstūmimo priedą į pluoštinį kompozitą, galima gerokai sumažinti vandens sugertį. Tubiguard 21 trumpalaikę vandens sugertį sumažino iki ~20,1 karto, o Tubiguard 13 ir Beiphob FR – ~2,0 kartus. Padidinus vandens atstūmimo priedo tirpalo koncentraciją iki 0,75 g/l, naudojant hidrofobizatorius Tubiguard 13 ir Tubiguard 21, trumpalaikės vandens sugerties sumažėjimas buvo panašus, o naudojant Beiphob FR – sumažėjimo pokytis buvo nedidelis. Padidinus vandens atstūmimo priedų tirpalų koncentraciją iki 1,25g/l, naudojant visus priedus trumpalaikės vandens sugertis sumažėjo vienodai. Padidinus priedų tirpalų koncentraciją iki 1,75 g/l, trumpalaikė vandens sugertis beveik nepakito.

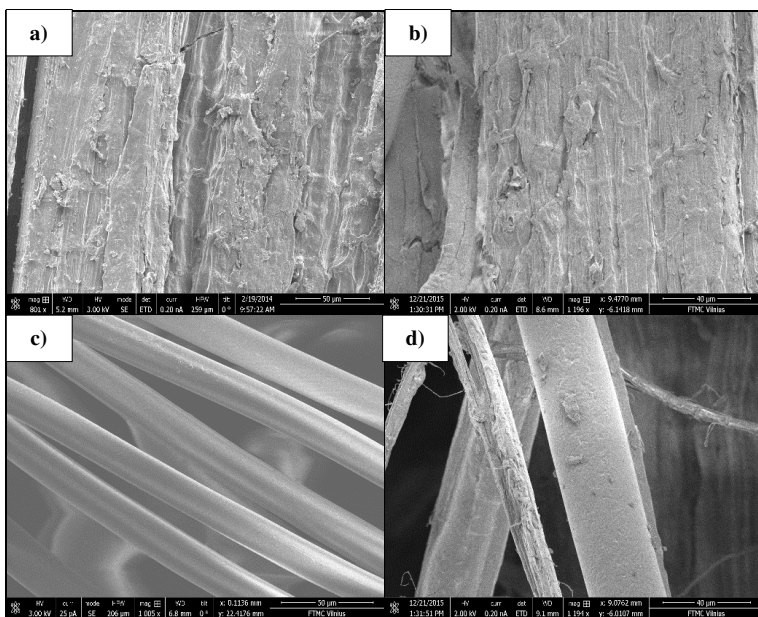


3.29 pav. Hidrofobizatorių poveikis pluoštinio kompozito vandens sugerčiai
Fig. 3.29. The impact of hydrophobizer on water absorption of fibrous composite

C-8 grandinės produktai (Tubiguard 13, Tubiguard 21) labai gerai atstumia vandenį. C-6 grandinės produktai (Beiphob FR) yra mažiau veiksmingi. Tačiau remiantis Europos Parlamento ir Europos Ministrų Tarybos 2006 m. gruodžio 12 d. direktyva 2006/122/EC, ribojančia kenksmingų junginių – perfluoroktano sulfonatų gamybą ir naudojimą dėl kenksmingo poveikio gamtai, daugelis pasaulio tekstilės chemijos gamintojų, plačiai žinomų ir Lietuvoje, tai „Huntsman“, „Clariant“, „Rudolf Chemie“, CHT-BEZEMA ir kt. paskelbė nutraukiančios C-8 telomerų gamybą ir pereinančios prie trumpesnės C-6 grandinės (pvz., perfluorbutano sulfonato ar perfluorkarboksilinės rūgšties) junginių, naudojamų vandens atstūmimo produktams, gamybos.

Kadangi hidrofobizatorius Beiphob FR yra naujos kartos ir mažiau kenksmingas aplinkai, todėl pluoštiniam kompozitui jis ir buvo parinktas.

3.30 paveiksle pateiktas neapdorotų ir apdorotų 1,25 g/l hidrofobine medžiaga kanapių ir PLA mikrostruktūros palyginimas. Atlikta mikrostruktūros analizė parodė (3.30 a pav.), kad neapdorotas kanapių pluoštas yra pasidengęs smulkiais organiniais dalelėmis, dulkėmis, kurios atsiranda dėl pluošto mechaninio apdorojimo. Taip pat aiškiai matyti, kad kanapių pluošto paviršius yra nelygus, rievėtas. 3.30 paveiksle, b matyti, kad kanapių plaušelio, apdoroto 1,25 g/l hidrofobine medžiaga Beiphob FR, paviršius padengtas plėvele, kuri suriša visas dulkeles, tačiau neužpildo tarpelių tarp plaušelių. Ši tolygiai padengianti plaušelius plėvelė neleidžia prasiskverbti vandeniui – sumažina trumpalaikę vandens sugertį.



3.30 pav. Padidinta kanapių ir polilaktido pluoštų mikrostruktūra: a) kanapių pluoštas, neapdorotas hidrofofizatoriumi ($\times 800$); b) kanapių pluoštas, apdorotas 1,25 g/l hidrofofizatoriumi Beiphob FR ($\times 1196$); c) polilaktido pluoštas, neapdorotas hidrofofizatoriumi ($\times 1005$); d) polilaktido pluoštas, apdorotas 1,25 g/l hidrofofizatoriumi Beiphob FR ($\times 1194$)

Fig. 3.30. Magnified microstructure of hemp fibres and polylactide fibres: a) untreated hemp fibres ($\times 800$); b) hemp fibres treated with 1.25 g/l concentration of hydrophobizer Beiphob FR ($\times 1196$); c) untreated polylactide fibres ($\times 1005$); d) polylactide fibres treated with 1.25 g/l concentration of hydrophobizer Beiphob FR ($\times 1194$)

PLA mikrostruktūroje (3.30 c pav.) galima matyti, kad PLA plaušeliai yra lygaus paviršiaus per visą plaušelio ilgį, tačiau 3.30 paveiksle, d matyti, kad apdorotas hidrofofizatoriumi PLA plaušelių paviršius nėra toks lygus – plaušeliai pasidengę smulkiomis kanapių pluošto dalelėmis, kurias taip pat suriša hidrofobinį poveikį turinti plėvelė.

3.4.5.2. Kompozito trumpalaikės vandens sugerties rezultatų statistinis apdorojimas

Nustatant kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, trumpalaikės vandens sugerties dydžio priklausomybę nuo hidrofobinės medžiagos kiekio, gautiems duomenims apdoroti buvo taikoma regresinė lygtis:

$$W_s = \frac{\frac{b_0}{1 + b_1 \cdot \exp^{b_2 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)}}}{b_3 + b_4 \cdot \left(\frac{V}{H}\right) + b_5 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2 + b_6 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2}, \quad (3.29)$$

čia W_s – trumpalaikė vandens sugertis per 24 valandas, kg/m^2 arba % pagal masę; b_0, b_1, b_2 – regresijos lygties pastovieji koeficientai, apskaičiuoti mažiausiųjų kvadratų metodu (Draper, Smith 1986); (V/H) – hidrofobinės medžiagos ir vandens kiekio santykis apdorojant bandinius, g/l .

3.31 paveiksle, a pateikta pluoštinio kompozito trumpalaikės vandens sugerties priklausomybė nuo hidrofobinės medžiagos kiekio buvo apytiksluota regresine lygtimi:

$$W_s = \frac{\frac{0,0306}{1 - 0,913 \cdot \exp^{-0,334 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)}}}{0,0790 + 0,167 \cdot \left(\frac{V}{H}\right) - 0,733 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2 + 0,622 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2}. \quad (3.30)$$

Jos vidutinis kvadratinis nuokrypis $S_r = 0,189$, o determinacijos koeficientas $\eta^2_{W\left(\frac{V}{H}\right)} = 0,988$. Gauta regresinė lygtis rodo, kad pluoštinio kompozito trumpa-

laikės vandens sugerties $\left(W, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)$ verčių variaciją 98,8 % lemia hidrofobinės medžiagos koncentracija ir tik 1,2 % – kiti veiksniai. Trumpalaikės vandens sugerties prognozuojamos vertės vienas pusis pasikliaujamasis intervalas $\delta = +1,32 \cdot 0,189 \approx 0,25$, kai $n = 24$, $t_\alpha = 1,32$ (Sachs 1976) ir tikimybė $(1 - \alpha) = 0,90$. Taigi trumpalaikės vandens sugerties didžiausios prognozuojamos vertės (kg/m^2) priklausomybę nuo naudotos hidrofobinės medžiagos tirpalo koncentracijos galima aprašyti lygtimi (3.31 a pav. punktyrinė linija):

$$W_s = \frac{\frac{0,0306}{1 - 0,913 \cdot \exp^{-0,334 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)}}}{0,0790 + 0,167 \cdot \left(\frac{V}{H}\right) - 0,733 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2 + 0,622 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2} + 0,25. \quad (3.31)$$

3.31 paveiksle, b pateikta pluoštinio kompozito trumpalaikės vandens sugerties, % pagal masę, priklausomybė nuo apdoroti naudotos hidrofobinės medžiagos tirpalo koncentracijos. Ji apytiksluota regresine lygtimi:

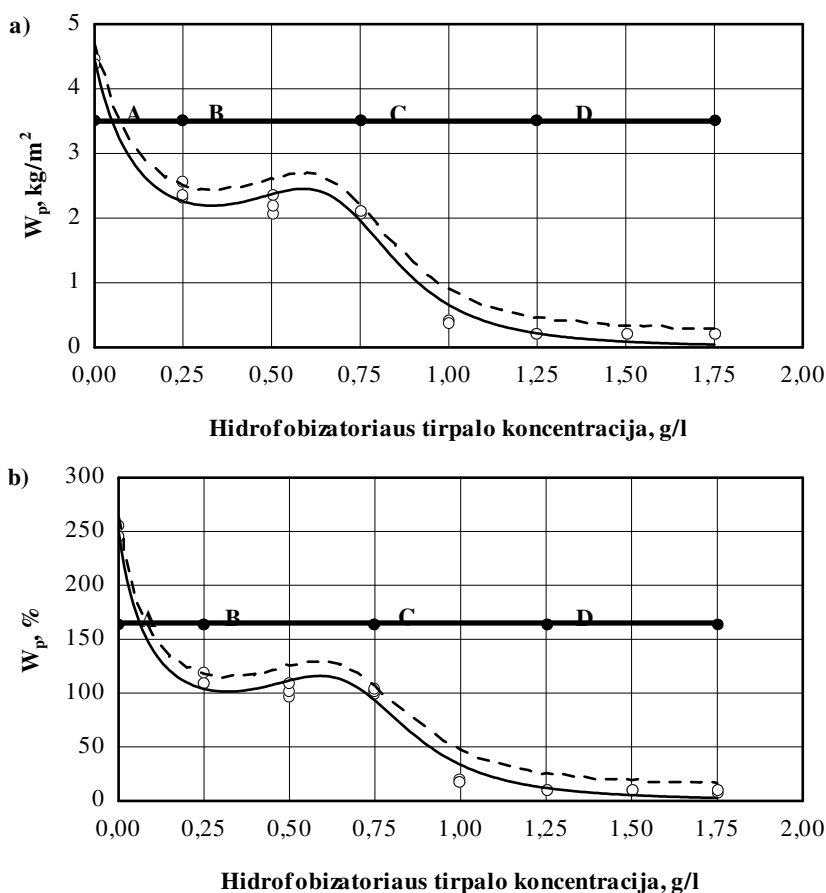
$$W_s = \frac{\frac{0,0224}{1 - 0,626 \cdot \exp^{-1,365 \left(\frac{V}{H}\right)}}}{0,00239 + 0,0156 \cdot \left(\frac{V}{H}\right) - 0,0480 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2 + 0,0380 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2}. \quad (3.32)$$

Jos vidutinis kvadratinis nuokrypis $S_r = 10,52$ ir determinacijos koeficientas $\eta^2_{W\left(\frac{V}{H}\right)} = 0,987$. Gauta regresinė lygtis rodo, kad pluoštinio kompozito trumpalaikės vandens sugerties (W , % pagal masę) verčių variaciją 98,7 % lemia hidrofobinės medžiagos tirpalo koncentracija ir tik 1,3 % – kiti veiksniai. Trumpalaikės vandens sugerties prognozuojamos vertės pagal (3.33) lygtį vienpusis pasikliaujamasis intervalas $\delta = +1,32 \cdot 10,52 \approx 13,89$, kai $n = 24$, $t_\alpha = 1,32$ (Sachs 1976) ir tikimybė $(1 - \alpha) = 0,90$. Taigi trumpalaikės vandens sugerties prognozuojamos vertės priklausomybę nuo didžiausios naudotos hidrofobinės medžiagos tirpalo koncentracijos galima aprašyta lygtimi (3.31 b pav. punktyrinė linija):

$$W_s = \frac{\frac{0,0224}{1 - 0,626 \cdot \exp^{-1,365 \left(\frac{V}{H}\right)}}}{0,00239 + 0,0156 \cdot \left(\frac{V}{H}\right) - 0,0480 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2 + 0,0380 \cdot \left(\frac{V}{H}\right)^2} + 13,89. \quad (3.33)$$

Atlikta eksperimentinių pluoštinio kompozito trumpalaikės vandens sugerties duomenų analizė parodė (3.31 a pav. ir 3.31 b pav.), kad, atsižvelgiant į bandiniams apdoroti naudotos hidrofobinės medžiagos tirpalo koncentraciją, trumpalaikės vandens sugerties pokyčius galima suskirstyti į keturias atkarpas (A, B, C ir D). Atkarpoje A, kur hidrofobinės medžiagos tirpalo koncentracija kito nuo 0 iki 0,25 g/l, pasireiškia staigus trumpalaikės vandens sugerties sumažėjimas – net 2 kartus (nuo 4,42 kg/m² iki 2,41 kg/m² arba nuo 249,1 % iki 112,9 % pagal masę).

Atkarpoje B, bandinius apdorojant nuo 0,25 g/l iki 0,75 g/l koncentracijos hidrofobine medžiaga, trumpalaikė vandens sugertis sumažėjo ~1,1 karto (nuo 2,41 kg/m² iki 2,09 kg/m² arba nuo 112,9 % iki 101,8 % pagal masę). Galima teigti, kad šioje atkarpoje vandens sugertis mažai priklauso nuo hidrofobizatoriaus tirpalo koncentracijos.



3.31 pav. Pluoštinio kompozito trumpalaikės vandens sugerties priklausomybė nuo hidrofobizatoriaus tirpalo koncentracijos: a) – trumpalaikė vandens sugertis, kg/m^2 ;

b) – trumpalaikė vandens sugertis pagal masę, %; \circ – eksperimentiniai rezultatai;

(—) – rezultatų empirinė linija; (---) – prognozuojamos vertės

Fig. 3.31. The dependence of short-term water absorption of fibrous composite on concentration of hydrophobizer. a) short-term water absorption, kg/m^2 ; b) – short-term water absorption, % by mass; \circ – experimental-expected results; (—) – the results of an empirical line of the results; (---) – predicted values

Atkarpoje C, bandinius apdorojant nuo 0,75 g/l iki 1,25 g/l koncentracijos hidrofbine medžiaga, pasireiškė staigus trumpalaikės vandens sugerties sumažėjimas. Trumpalaikė vandens sugertis sumažėjo ~10,0 karto (nuo 2,09 kg/m^2 iki 0,21 kg/m^2 arba nuo 101,8 % iki 10,4 % pagal masę).

Atkarpoje D, bandinius apdorojant nuo 1,25 g/l iki 1,75 g/l koncentracijos hidrofobine medžiaga, trumpalaikė vandens sugertis beveik nesumažėjo (nuo 0,21 kg/m² iki 0,20 kg/m² arba nuo 10,4 % iki 10,2 % pagal masę). Galima teigti, kad ir šioje atkarpoje vandens sugertis nuo hidrofobizatoriaus koncentracijos mažai priklauso.

Palyginus neapdorotus hidrofobizatoriumi pluoštinio kompozito bandinius ir apdorotus 1,75 g/l koncentracijos hidrofobine medžiaga, trumpalaikė vandens sugertis sumažėjo ~21,0 karto (nuo 4,42 kg/m² iki 0,21 kg/m² arba nuo 249,1 % iki 10,4 % pagal masę). Galima teigti, kad optimali hidrofobinės medžiagos tirpalo koncentracija yra 1,25 g/l, kadangi intervale nuo 1,25 g/l iki 1,75 g/l trumpalaikės vandens sugerties pokyčio nėra.

Gautos regresinės lygtys (3.30–3.33) gali būti sėkmingai taikomos trumpalaikės vandens sugerties vertėms prognozuoti.

3.4.6. Kompozito pralaidumo vandens garams tyrimai

Pralaidumas vandens garams yra svarbi medžiagos savybė, norint pluoštinį kompozitą instaliuoti atitvarinėse konstrukcijose. Šis dydis taikomas skaičiuojant atitvarinių konstrukcijų drėgminį režimą.

Pralaidumo vandens garams bandymai buvo atliekami su kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, bandiniais, kurių tankis – ~40 kg/m³. Remiantis trumpalaikės vandens sugerties eksperimentiniais duomenimis pluoštinio kompozito bandiniai buvo apdoroti 1,25 g/l koncentracijos Beiphob FR hidrofobine medžiaga. Pluoštinio kompozito pralaidumo vandens garams eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Pluoštinio kompozito pralaidumo vandens garams tyrimų rezultatai

Table 3.9. Test results of water vapour transmission for fibrous composite

Imtis	Vandens garų srauto tankis, g, mg/m ² ·h	Vandens garų pėmos koef., W, mg/m ² ·h·Pa	Garinė varža, Z, m ² ·h·Pa/mg	Savitasis vandens garų pralaidumas, δ, mg/m·h·Pa	Santykinė garinė varža, μ	Ekviv. pagal difuziją oro sluoksnio storis (1 būdu), S, m
Pluoštinio kompozito bandiniai, padengti 1,25 g/l koncentracijos Beiphob FR hidrofobizatoriumi						
Vid.	10301	8,51	0,118	0,395	1,80	0,083
Stand.	399,4	0,33	0,0060	0,0073	0,051	0,0040

3.9 lentelės pabaiga

Pluoštinio kompozito bandiniai, nepadengti hidrofbizatoriumi						
Vid.	9728	8,04	0,124	0,415	1,72	0,089
Stand.	285,1	0,24	0,0044	0,0153	0,066	0,0027

Mokslininkai Latif *et al.* (2014) tyrė kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir poliesterio rišiklio, pralaidumą vandens garams ir nustatė, kad bandinių santykinės garinės varžos faktorius kito nuo 1,57 iki 2,74, esant tyrimo klimatinėms sąlygoms 50/93. Mūsų ir užsienio autorių gauti tyrimų rezultatai iš esmės yra panašūs.

3.4.7. Kompozito degumo tyrimai

Viena iš svarbių augalinės kilmės pluoštinių medžiagų trūkumų, ribojančių panaudojimą, yra didelis jų degumas, keliantis gaisrų pavojų. Siekiant sumažinti ar sulėtinti tokių medžiagų degumą, naudojamos nuo ugnies poveikio apsaugančios cheminės priemonės – antipirenai.

Pluoštinio kompozito ir atskirų pluoštų – kanapių ir PLA – degumo bandymų duomenys pateikti 3.10 lentelėje.

3.10 lentelė. Pluoštinio kompozito bandinių, naudojant skirtingus antipirenų tipus ir tirpalo koncentracijas, degumo charakteristikos

Table 3.10. Flammability characteristics of fibrous composite with different flame retardant types and their concentrations

Bandiniai	PLA pluoštas	Kanapių pluoštas	Kompozitas, sudarytas iš kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio						
Kompozitas su Flovan CGN, kai jo tirpalo koncentracija, g/l arba % pagal masę	Tirpalo koncentracija g/l arba % pagal masę								
	0 0	0 0	0 0	5 0,5	15 1,5	25 2,5	35 3,5	45 4,5	55 5,5
Liepsnos plitimas veikiant liepsnos židiniui (15 s)	Ne*	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Ne	Ne
Liepsnos plitimas neveikiant liepsnos židiniui (>15 s)	Ne	Ne**	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Ne	Ne

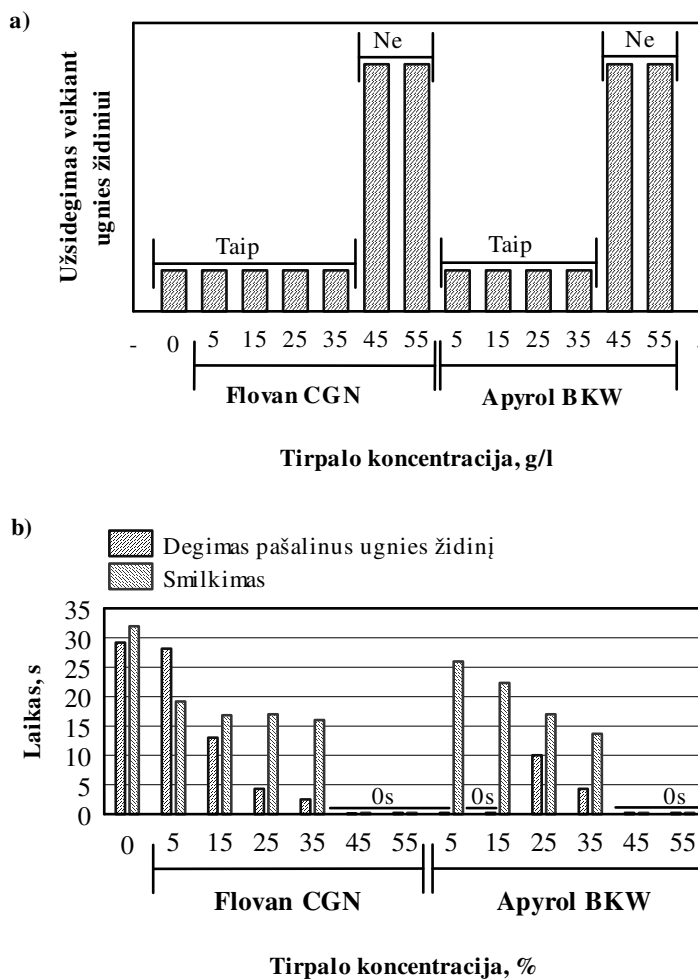
3.10 lentelės pabaiga

Liepsnojančios lašai ar dalelės	Ne*	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Masės nuostoliai, %	0,20	18,74	11,28	7,60	3,53	3,26	1,65	0,40	0,25
Kompozitas su Apyrol B KW, kai jo tirpalo koncentracija, g/l arba % pagal masę	0	0	0 0	5 0,5	15 1,5	25 2,5	35 3,5	45 4,5	55 5,5
Liepsnos plitimas veikiant liepsnos židiniui (15s)	Ne*	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Ne	Ne
Liepsnos plitimas neveikiant liepsnos židiniui (>15 s)	Ne*	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Liepsnojančios lašai ar dalelės	0,20	18,74	11,28	4,56	3,66	2,72	1,66	0,44	0,39
Masės nuostoliai, %	Ne	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Taip	Ne	Ne

Pradiniame etape buvo siekiama nustatyti bandiniams apdoroti reikalingą antipireno tirpalo koncentraciją, kuri užtikrintų, kad gaminys neužsidegs. Nepriklausomai nuo antipireno tipo, rezultatai gauti labai panašūs. Abiem atvejais nustatyta, kad racionalus antipireno kiekis apdorojant bandinius yra 45 g/l (4,5 %) (3.32 pav.). Toliau didinant antipireno kiekį, rezultatas nesikeičia – nevyksta degimas nei esant ugniai, nei be ugnies, o masės nuostoliai išlieka vieno di arba keičiasi nedaug.

*Kai liepsnos židinis yra vienoje vietoje, tai pluoštai tirpsta, bet neužsidega. Jei liepsnos židinis išlaikomas vienodu atstumu ~20 mm iki tirpstančio PLA, tuomet tirpstantys lašai užsiliepsnoja ir nukritę ant filtravimo popieriaus jį uždega. Naudojamas kompozite PLA rišiklio kiekis yra nedidelis, todėl nesusidaro stambių lašų ir jis neužsidega bei veikia kaip ugnies slopiklis.

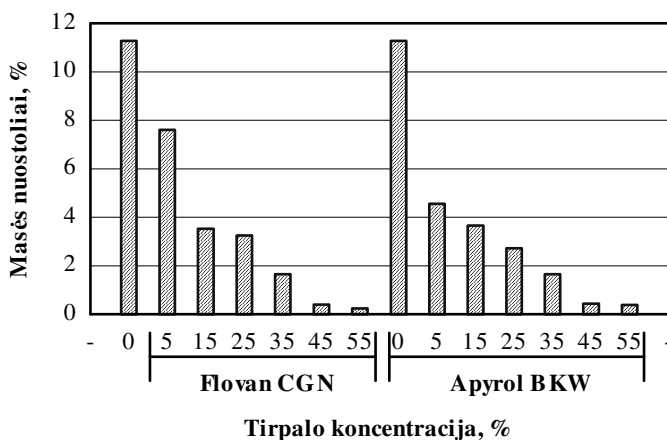
**Veikiant liepsnos židiniui liepsna staigiai išplinta visame bandinio paviršiuje. Veikiant liepsnos židiniui per 15 s visas bandinio paviršius apdega ir apanglėja bei liepsna užges-ta.



3.32 pav. Pluoštinio kompozito degumo tyrimai: a) užsidegimas veikiant ugnies židiniui; b) degimo ir smilkimo laikas pašalinus ugnies židinį

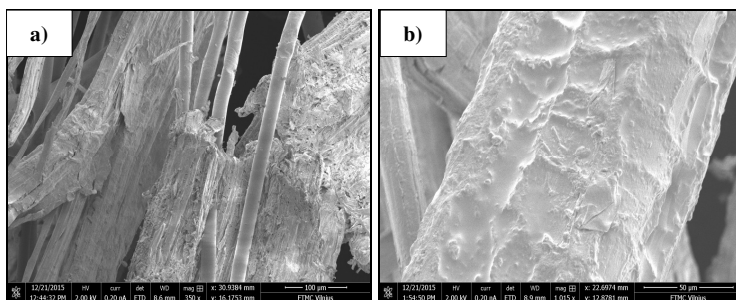
Fig. 3.32. Flammability of fibrous composite: a) ignition under fire source; b) the time of combustion and smoldering after removal of fire source

3.33 paveiksle pateikiami pluoštinio kompozito masės nuostoliai dėl degimo, naudojant 45 g/l (4,5 %) koncentracijos antipirenus, Flovan CGN antipireno atveju, šiuos nuostolius pavyko sumažinti 96,5 %, o naudojant Apyrol BKW – 96,1 %.



3.33 pav. Pluoštinio kompozito masės nuostoliai degimo metu
Fig. 3.33. Mass loss on ignition of fibrous composite

3.34 paveiksle pateikta padengto antipirenu pluoštinio kompozito mikrostruktūra. Naudojant antipireną, pluoštinio kompozito plaušeliai ir smulkios dalelės padengiamos plona plėvele (3.34 b pav.), dėl ko bandiniai apsaugomi nuo ugnies poveikio. Naudojant per mažą kiekį antipireno, bandinio plaušeliai padengiami tik atskiruose plotuose, o nepadengti plotai ir yra ugnies plitimo židiniai.

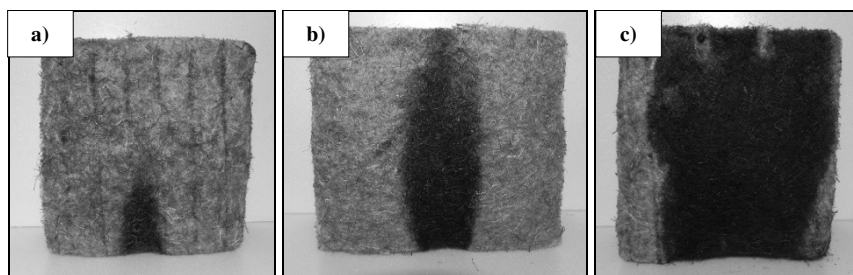


3.34 pav. Padidintas pluoštinio kompozito bendras vaizdas: a) be antipireno ($\times 350$);
b) su antipirenu ($\times 1\,015$)

3:34. Fig. Magnified general view of fibrous composite: a) without flame retardant ($\times 350$); b) with flame retardant ($\times 1\,015$)

Nuo panaudoto antipireno kiekio priklauso ir ugnies plitimo būdas. Kai bandinio dalelės visiškai padengtos antipirenu, ugnies poveikis matomas tik tame bandinio taške (3.35 a pav.), kur veikia ugnies židinis, tačiau toje vietoje

nematoma nei ugnies plitimo nei rusenimo. Kai bandinio plaušeliai nepadengiami visiškai antipirenu, matomas ugnies sklidimas per visą bandinio aukštį, tačiau per visą bandinio plotį ugnis nesklinda (3.35 b pav.). Kai bandinys nepadengtas antipirenais ar padengtas labai mažai, ugnis sklinda per visą bandinio paviršių (3.35 c pav.).



3.35 pav. Bandinių vaizdas po degumo tyrimų, kai antipireno tirpalo koncentracija, g/l: a) – 55; b) – 25; c) – 5

3.35. Fig. The view after flammability test of fibrous composite with different flame retardant concentrations, g/l: a) 55; b) 25; c) 5

Analizuojant eksperimentinius duomenis matyti, kad gryno kanapių pluošto degimo masės nuostoliai yra daugiau nei 60 % didesni už pluoštinio kompozito masės nuostolius. Atlikti PLA degumo bandymai parodė, kad PLA, veikiant ugnies židiniui, neužsidega, o tik lydosi, o jo masės nuostoliai sudaro tik 0,20 %. Galima teigti, kad PLA kompozite leidžia sumažinti ugnies plitimą ir taip pat masės nuostolius. Kadangi PLA plaušeliai išsiraizgę po visą kompozitą, tai veikiant ugniai lėtina arba stabdo susikertančių kanapių plaušelių degimą.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Tirtų natūralių pluoštų – kanapių, linų, durpių – šilumos laidumas glaudžiai susijęs su pirminiu pluoštų mechaniniu apdorojimu. Mechaninis apdorojimas lemia ne tik medžiagos tankį, bet leidžia suformuoti plaušelius, turinčius skirtingą mikrostruktūrą. Nors ilgesnis ir sudėtingesnis mechaninis apdorojimas leidžia gauti geresnės kokybės, t. y. mažiau šilumai laidžius, gaminius, tačiau tokiu būdu prailginama pluoštų paruošimo trukmė, reikalingi sudėtingesni įrenginiai, o tai lemia produkto pabrangimą. Pagal eksperimentinius tyrimų rezultatus, vertinant šiluminės charakteristikas ir pluošto paruošimo sudėtingumą, racionalu naudo-

ti trumpąjį pluoštą, gautą du kartus mechaniškai apdorojus dantytais velenais.

2. Tirtų natūraliųjų pluoštų šilumos laidumas priklauso ne tik nuo mechaninio apdorojimo būdo (smulkinimo, malimo, šukavimo), bet ir nuo suformuotos medžiagos tankio. Kaip ir daugumos termoizoliacinių medžiagų, taip ir tirtų pluoštų šilumos laidumas mažo tankio ribose yra didžiausias, o tankį didinant iki tam tikros ribos, šilumos laidumas mažėja. Mažiausios šilumos laidumo vertės labai priklauso nuo medžiagos kilmės ir apdorojimo būdo. Pagal darbo rezultatus apskaičiuotos regresinės lygtys leidžia prognozuoti gautų natūralių pluoštų (kanapių, linų ir durpių) šilumos laidumo koeficientą, kintant tankio intervalui nuo $39,6 \text{ kg/m}^3$ iki $102,5 \text{ kg/m}^3$.
3. Atlikus eksperimentinių duomenų statistinį apdorojimą, nustatyta, kad kompozito iš kanapių pluošto ir rišiklio – durpių pluošto – šilumos laidumo koeficientas priklauso nuo medžiagos struktūros (chaotiško plaušelių išsidėstymo, susidariusių tarpluoštinių ryšių) ir tankio ($\lambda = (0,0436-0,0481) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), kai tankis $\rho = (173-186) \text{ kg/m}^3$.
4. Eksperimentinių duomenų statistinė analizė parodė, kad kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir PLA rišiklio, gniuždymo įtempis gniuždant statmenai formavimo kryptčiai padidėja du kartus rišiklio kiekį padidinus nuo 11 % iki 15 %, o tankio poveikis kompozito gniuždymo įtempiui yra nedidelis – jam kintant skirtumas sudaro apie 2 %. Tačiau gniuždymo įtempis gniuždant kitomis apkrovos veikimo kryptimis skiriasi – išilgai ir skersai gaminio formavimo krypties padidėja 3,1 karto. Padidinus pluoštinio kompozito PLA rišiklio kiekį nuo 11 % iki 15 %, tempimo stipris visomis formavimo kryptimis didėja ~2,0 kartus.
5. Atlikus eksperimentinių duomenų palyginimą, nustatyta, kad PLA rišiklio kiekio kompozite poveikis jo šilumos laidumo koeficientui yra proporcingai nedidelis. Kompozito, sudaryto iš kanapių pluošto ir 11 % PLA rišiklio bei kanapių pluošto ir 15 % PLA rišiklio, tankiui kintant nuo 40 kg/m^3 iki 90 kg/m^3 , jo šilumos laidumo koeficientas sumažėja tik apie 4 %.
6. Nustatyta, kad pluoštinis kompozitas pasižymi geromis akustinėmis savybėmis. Garso sugerties koeficientas dažnių diapazone nuo 800 Hz iki 2000 Hz, kai kompozito tankis yra 80 kg/m^3 , svyruoja apie 0,9, o kai tankis yra 40 kg/m^3 , garso sugerties koeficientas tame pačiame dažnių diapazone kinta nuo 0,7 iki 0,9.

7. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad nedideli kiekiai hidrofobizatoriaus kelis kartus sumažina kompozito trumpalaikę vandens sugertį. Nenaudojant hidrofobizatoriaus trumpalaikės vandens sugerties vertės yra didesnės nei 4 kg/m^2 , o naudojant $1,25 \text{ g/l}$ koncentracijos hidrofobizatorių tirpalus, trumpalaikė vandens sugertis svyruoja apie $0,2 \text{ kg/m}^2$ ir nepriklauso nuo hidrofobizatoriaus tipo.
8. Nustatyta, kad hidrofobizatoriaus įtaka vandens garų pralaidumui yra nedidelė. Tiek hidrofobintas, tiek nehidrofobintas kompozitas pasižymi geru vandens garų laidumu, o santykinė garinė varža abiem atvejais yra ne didesnė nei 1,8.
9. Eksperimentinių tyrimų analizė parodė, kad PLA rišiklis slopina kompozito degumą, o naudojant 45 g/l koncentracijos antipirenų priedus, kompozitas apsaugomas nuo užsidegimo ir smilkimo.
10. Nustatyta, kad reguliuojant kanapių plaušų išsidėstymo gaminio struktūroje kryptingumą (pvz.: gofravimo būdu ir kt.) ir PLA rišiklio kiekį, galima gaminti norimo stiprumo gaminius.

Bendrosios išvados

1. Makro- ir mikrostruktūros tyrimais nustatyta, kad mechaninis natūralių pluoštų apdorojimas – šukavimas, smulkinimas, malimas – sukuria tam tikrą erdvinį pluoštų karkasą, pasižymintį plonų pluoštų ir mažų porų visuma ir lemiantį šilumos laidumo koeficiento dydį. Skirtingai mechaniškai apdorotų natūralių pluoštų tankis kinta nuo 40 kg/m^3 iki 100 kg/m^3 , o šilumos laidumo koeficientas – nuo $0,0335 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ iki $0,0592 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

1.1. Šukavimas sukuria geriausią makro- ir mikrostruktūrą, kuri lemia mažiausią šilumos laidumo koeficientą dėl susidariusio pluoštų erdvinio karkaso – itin plonyčių plaušelių, kurių skersmuo yra nuo $20 \text{ }\mu\text{m}$ iki $140 \text{ }\mu\text{m}$, daug oro tarpelių ir susikirtimo vietų. Šukuotų natūralių pluoštų, kurių ilgis kito nuo 2 cm iki 7 cm , šilumos laidumo koeficientas kito nuo $0,0539 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ iki $0,0335 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, esant tankiui nuo 40 kg/m^3 iki 90 kg/m^3 .

1.2. Smulkinimas sukuria optimalią makro- ir mikrostruktūrą – erdvinę struktūrą, sudarytą iš plonų plaušelių (skersmuo yra $40\text{--}450 \text{ }\mu\text{m}$, ilgis – $2\text{--}7 \text{ cm}$), oro tarpų, kuri lemia šiek tiek mažesnę už šukuoto pluošto šilumos laidumo koeficientą – $0,0539\text{--}0,0375 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, kai tankis kito nuo 40 kg/m^3 iki 90 kg/m^3 .

1.3. Malimas sukuria blogą makro- ir mikrostruktūrą, kuri lemia didžiausią šilumos laidumo koeficientą dėl atsiradusių dulkių bei padidėjusio kontaktinių zonų ploto. Maltų natūralių pluoštų (ilgis – $\leq 2 \text{ cm}$) šilumos laidumo koeficientas

kito nuo 0,0490 W/(m·K) iki 0,0438 W/(m·K), tankiui kintant nuo 40 kg/m³ iki 90 kg/m³.

1.4. Palyginus natūralių pluoštų šilumos laidumo koeficiento vertes ir pluošto išeigą, gautą po įvairaus mechaninio apdorojimo, nustatyta, kad trumpasis kanapių pluoštas (2–3) cm po smulkinimo yra optimalus termoizoliacinio kompozito gamybai.

2. Naudojant mechaninį apdorojimą – malimą – gaunamas durpių pluoštas, kuris yra tinkamas klogo formavimui bei kaip rišiklis kompozito gamybai, pasižymintis gera makro- ir mikrostruktūra, turintis mažą šilumos laidumo koeficientą. Tačiau bandinių ruošimo metu patiriamos didelės laiko, darbo ir energijos sąnaudos.

2.1. Malant durpes gaunami durpių plaušeliai, mažesni nei 2 cm ilgio ir 10–125 μm skersmens, o iš jų suformuoto klogo šilumos laidumo koeficientas kinta nuo 0,050 W/(m·K) iki 0,037 W/(m·K), esant tankiui – 40–70 kg/m³, tačiau mechaninio apdorojimo metu pluošto išeiga siekia tik 20 %.

2.2. Naudojant smulkintą kanapių pluoštą (2–3 cm) ir durpių pluoštą kaip rišiklį, sukurtas termoizoliacinis kompozitas, kuriame susidaro tarppluoštinių ryšių zonos. Kompozitas pasižymi mažu šilumos laidumo koeficientu – 0,0436–0,0481 W/(m·K), esant tankiui nuo 173 kg/m³ iki 186 kg/m³, tačiau jo paruošimui reikalingos didelės laiko ir energijos sąnaudos – bandiniai iki pilno jų paruošimo džiovinami 48 val. 70 °C temperatūroje.

3. Naudojant smulkintą kanapių pluoštą (2–3 cm), polilaktido rišiklį, hidrofobizatorius ir antipirenus bei pritaikytą neaustinių medžiagų technologiją sukurtas optimalios struktūros, lemiančios geras fizikines ir mechanines savybes, termoizoliacinis kompozitas.

3.1. Padidinus polilaktido pluošto rišiklio kiekį nuo 11 % iki 15 %, kompozito tempimo stipris statmenai formavimo kryptčiai padidėja iki 2,4 karto, skersai formavimo kryptties – iki 1,8 karto, išilgai – iki 1,6 karto; gniuždymo įtempis skersai ir išilgai formavimo kryptties padidėja iki 3,1 karto. Taigi, reguliuojant pluoštų išsidėstymo kryptingumą struktūroje ir rišiklio kiekį, galima gauti skirtingų stipruminių savybių gaminius.

3.2. Kompozitas, sudarytas iš smulkinto kanapių pluošto ir 15 % polilaktido pluošto rišiklio, užtikrina mažą šilumos laidumo koeficientą, kintantį nuo 0,0383 W/(m·K) iki 0,0367 W/(m·K), kai atitinkamai medžiagos tankis yra 40–90 kg/m³; didelį garso sugerties koeficientą, kuris svyruoja nuo 0,34 iki 1,0, dažniui kintant nuo 250 Hz iki 1000 Hz (tankis – 20–100 kg/m³).

3.3. Tinkamai parinkus hidrofobizatoriaus tipą ir jo tirpalo koncentraciją, kompozito vandens sugertis sumažėja 21 kartą, o tinkamai parinkus antipireno tipą ir jo tirpalo koncentraciją, kompozito masės nuostoliai sumažinami iki 96,5 %. Nustatyta, kad optimali hidrofobizatoriaus tirpalo koncentracija yra 1,25 g/l, o antipireno – 45 g/l.

Literatūra ir šaltiniai

Adekunle, K. F. 2015. Surface Treatments of Natural Fibres – A Review: Part 1, *Open Journal of Polymer Chemistry* 5: 41–46.

Ahmad, I.; Baharum, A.; Abdullah, I. 2006. Effect of extrusion rate and fiber loading on mechanical properties of Twaron fiber–thermoplastic natural rubber (TPNR) composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 25: 957–965.

Alix, S.; Philippe, E.; Bessadok, A.; Lebrun, L.; Morvan, C.; Marais, S. 2009. Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres, *Biore-source Technology* 100: 4742–4749.

Anthony, W. S. 2005. Development of machines to separate fiber and shive from seed flax straw, *Applied Engineering in Agriculture* 21(6): 1057–1063.

Arib, R. M. N.; Sapuan, S. M.; Hamdan, M. A. M. M.; Paridah, M. T.; Zaman, H. M. D. K. 2004. A literature review of pineapple fibre reinforced polymer composites, *Polymers and polymer composite* 12: 341–348.

Asdrubali, F. 2007. Green and sustainable materials for noise control in buildings in *19th International Congress on Acoustics Madrid*, 1–6.

Asdrubali, F.; D'Alessandro, F.; Schiavoni, S. 2015. A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustainable Materials and Technologies* 4: 1–17.

Assarar, M.; Scida, D.; Mahi, A. E.; Poilâne, C.; Ayad, R. 2011. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres, *Materials and Design* 32: 788–795.

Aivazyan, S. 1968. *Statistical Investigation of Dependences. Application of the Methods of Correlation and Regression Analyses to Processing Experimental Results* [in Russian], Metallurgiya, Moscow, 228 p.

Balčiūnas, M.; Jankauskienė, Z. 2008. Įvairaus tankumo linų pasėlio pluošto išeigos ir kokybės pokyčiai klijėjimosi metu, *Žemdirbystė* 94(4): 81–96.

Ballagh, K. O. 1996. Acoustical Properties of Wool, *Applied Acoustics* 48 (2): 101–120.

Bax, B.; Müssig, J. 2008. Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. *Composites Science and Technology* 68: 1601–1607.

Beghi, M. G. 2013. *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices*. Publisher: inTech, Chapters published.

Bennett, S. J.; Snell, R.; Wright, D. 2006. Effect of variety, seed rate and time of cutting on fibre yield of dew-retted hemp. *Industrial Crops and Products* 24: 79–86.

Berardi, U.; Iannace, G. 2015. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications, *Building and Environment* 94(2): 840–852.

Berge, B. 2009. *The Ecology of Building Material*, Oxford: Elsevier, 447 p.

Berger, J. 1969. *The world's major fibre crops, their cultivation and manuring*, Centre d'Etude de l'Azote. Zwitzerland. 294 p.

Berthol, J.; Olsson, R. J. O.; Salmen, L. 1998. Water sorption to hydroxyl and carboxylic acid groups in Carboxymethylcellulose (CMC) studied with NIR-spectroscopy, *Cellulose* 5: 280–298.

Bessonova, N. G.; Zhiharev, A. P. 2007. *Thermal properties of materials for light industry: a Monograph*, M. MGUD, 119 p.

Blackburn, R.S. 2005. *Biodegradable and sustainable fibres*, Cambridge: Woodhead Publishing Series in Textiles: 47, The Textile Institute.

Borisova, A.; Reihmane, S. 2013. Hydrophobic Treatment of Blended Fabric's Surface, *Materials Science / Medžiagotyra* 19(2): 169.

Buska, A. 2010. *Makrostruktūros ir kitų fizinių savybių įtaka mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodikliams*, Daktaro disertacija, Vilnius „Technika“.

Celino, A.; Goncalves, O.; Jacquemin, F.; Freour, S. 2014. Qualitative and quantitative assessment of water sorption in natural fibres using ATR-FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers* 101: 163–170.

Chandana, E.; Hussian, Dr. S. A. 2013. Thermal conductivity Charakterization of Bamboo fiber reinforced in Epoxy Resin. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 9(6): 7–14.

Chandranohan, D.; Marimuthu, K. 2011. A review on natural fibers, *The International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* 8(2): 194–206.

Chetyrkin Y. 1977. *Statistical methods of prediction*. Statistika, Moscow, 200 p. [in Russian].

Chow, C. P. L.; Xing, X. S.; Li, R. K. Y. 2007. Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites, *Composites Science and Technology* 67: 306–313.

Cicero, J. A.; Dorgan, J. R. 2002. Physical properties and fiber morphology of poly(lactic acid) obtained from continuous two-step melt spinning, *Journal of Polymers and the Environment* 9(1): 1–10.

Davies, G. C.; Bruce, D. M. 1998. Effect of environmental relative humidity and damage on the tensile properties of flax and nettle fibers, *Textile Research Journal* 68: 623–629.

Dhakal, H. N.; Zhang, Z. Y.; Richardson, M. O. W. 2007. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology* 67: 1674–1683.

Draper N.; Smith G. 1973. *The applied regression analysis*, Moscow, Statistics, 392 p. (Translation into Russian).

Etaati, A.; Pather, S.; Fang, Z.; Wang, H. 2014. The study of fibre/matrix bond strength in short hemp polypropylene composites from dynamic mechanical analysis, *Composites: Part B* 62: 19–28.

Fages, E.; Cano, M. A.; Girones, S.; Boronat, T.; Fenollar, O.; Balart, R. 2013. The use of wet-laid techniques to obtain flax nonwovens with different thermoplastic binder fibers for technical insulation applications, *Textile Research Journal* 83(4): 426–437.

Faruk, O.; Bledzki, A. K.; Fink, H. S.; Sain, M. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010, *Progress in Polymer Science* 37: 1552–1596.

Fatima, S.; Mohanty, A. R. 2011. Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials, *Applied Acoustics* 72: 108–114.

Freivalde, L.; Kukle, S. 2012. Content of hemp fibres and properties of nonwovens, *Materials Science, Textile and Clothing Technology* 84–89.

Freivalde, L.; Kukle, S. 2012. Mechanical properties of hemp fibres and insulation materials, In: *XIII Starptautiskā zinātniskā konference "Ilgtspējīga uzņēmējdarbība mainīgos ekonomiskos apstākļos": Biznesa augstskolas Turība konferenču rakstu krājums*.

Freivalde, L.; Kukle, S.; Andžs, M.; Bukšans, E.; Gravitis, J. 2014. Flammability of raw insulation materials made of hemp, *Composites: Part B* 67: 510–514.

Gailius, A.; Vėjelis, S. 2010. *Termoizoliacinės medžiagos ir jų gaminiai*, Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“, Vilnius. 170 p.

Gassan, J.; Chate, A.; Bledzki, A. K. 2001. Calculation of elastic properties of natural fibres, *Journal of Materials Science* 36(15): 3715–3720.

Gnip, I.; Keršulis, V. 1998. Ekovatos šiluminės techninės savybės, *Statyba* 4(1): 43–48.

- Grexa, O.; Lübke, H. 2001. Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter, *Polymer Degradation and Stability* 74: 427–432.
- Grexa, O.; Poutch, F.; Manikova, D.; Martvonova, H.; Bartekova, A. 2003. Intumescence in fire retardancy of lignocellulosic panels, *Polymer Degradation and Stability* 82: 373–377.
- Gupta, B.; Revagade, N.; Hilborn, J. 2007. Poly(lactic acid) fiber: An overview, *Progress in Polymer Science* 31: 455–482.
- Gužas, D.; Klimas, R.; Tricys, V. 2006. Noise and Vibration Reduction, *Conference Mechatronic Systems and Materials*, Krakow, Poland.
- Hobson, R. N.; Hepworth, D. G.; Bruce, D. M. 2001. Quality of Separated from Unretted Hemp Stems by Decortication, *Journal of Agricultural Engineering Research* 78(2): 153–158.
- Holbery, J.; Houston, D. 2006. Natural–fiber–reinforced polymer composites in automotive applications, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)* 58(11): 80–86.
- Hu, R.; Lim, J.-K. 2007. Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites, *Journal of Composite Materials* 41(13): 1655–1669.
- Hui, Z.; Fan, X. 2009. Sound absorption properties of hemp fibrous assembly absorbers, *Sen'i Gakkaishi* 65(12): 191–196.
- Yan, L.; Chouw, N.; Jayaramanb, K. 2014. Flax fibre and its composites – A review, *Composites Part B: Engineering* 56: 296–317.
- Ye, Z.; Wells, C. M.; Carrington, C. G.; Hewitt, N. J. 2006. Thermal conductivity of wool and wool–hemp insulation, *International Journal of Energy Research* 30: 37–49.
- Yu, T.; Ren, J.; Li, S.; Yuan, H.; Li, Y. 2010. Effect of fiber surface–treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites, *Composites: Part A* 41: 499–505.
- Jankauskienė, Z.; Bačelis, K. 2009. Naujų pluoštinių linų veislių ‘Dangiai’, ‘Snaigiai’ ir ‘Sartai’ sukūrimas bei tyrimai, *Žemės ūkio mokslai* 16(1–2): 31–40.
- Jankauskienė, Z.; Gruzdevienė, E.; Endriukaitis, A. 2007. *Sėjamiųjų kanapių auginimo technologija*, Lietuvos žemdirbystės institutas, 27 p.
- Jaunkauskienė, Z.; Butkutė, B.; Gruzdevienė, E.; Cesevičienė, J.; Fernando, A. L. 2015. Chemical composition and physical properties of dew– and water–retted hemp fibers. *Industrials Crops and Products* 75(B): 206–211.
- Jinming H.; Xuehui M. 2009. *Coal, oil shale, natural bitumen, heavy oil and peat*, U-NESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK.
- Jirsak, O.; Wadsworth, L. C. 1999. *Nonwoven Textiles*, Durham, North Carolina: Carolina Academic Press, 133 p.

- Kalb, B.; Pennings, A. J. 1980. General crystallization behavior of poly(L-lactic acid). *Polymer* 21: 607–612.
- Kandola, B. K. 2012. Flame retardant characteristics of natural fibre composites, *Natural Polymers* 1: 86–117.
- Kaminskas, A. 2002. *Energijų tausojančios statybinių medžiagų technologijos*, Viešoji įstaiga „Knygų naujienos“, Vilnius, 256 p.
- Kicinska-Jakubowska A.; Bogacz, E.; Zimniewska, M. 2012. Review of natural fibers. Part I – vegetable fibers, *Journal of Natural Fibers* 9:150–167.
- Kijauskas, A. 1991. *Linų ir cheminių pluoštų verpimas. Pluošto maišymas, karšimas, sluoksnių šukavimas*, Kauno technologijos universitetas, Tekstilės medžiagų katedra, 52 p.
- Kymäläinen H.-R.; Sjöberg A.-M. 2008. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations, *Building and Environment* 43: 1261–1269.
- Kymäläinen, H.-R. 2004. Quality of *Linum usitatissimum* L. (flax and linseed) and *Cannabis Sativa*) L. (fibre hemp) during the production chain of fibre raw material for thermal insulations. Academic dissertation.
- Kymäläinen, H.-R., Koivula, M., Kuisma R., Sjöberg, A.-M., Pehkonen, A., 2004. Technologically indicative properties of straw fractions of flax, linseed (*Linum usitatissimum* L.) and fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Bioresource Technology* 94, 57–63.
- Kymäläinen, H.-R.; Hautala, M.; Kuisma, R.; Pasila, A. 2001. Capillarity of flax/linseed (*Linum usitatissimum* L.) and fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) straw fractions, *Industrial Crops and Products* 14: 41–50.
- Kymäläinen, H.-R.; Koivula, M.; Kuisma, R. 2002. Quality requirements of flax, linseed and hemp fibre for insulation materials, *In: Agricultural machinery, buildings and hydraulic engineering, Tartu: Estonian Agricultural University, Transactions* 215: 88–92.
- Korjakins A.; Toropovs N.; Kara, P.; Upeniece, L.; Shakhmenko, G. 2013. Application of Peat, Wood Processing and Agricultural Industry By-products the Insulating Building Materials, *Journal of sustainable architecture and civil engineering* 1(2): 62–67.
- Korjenic, A.; Zach, J.; Hroudova, J. 2011. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy and Building* 43: 2518–2523.
- Korjenic, A.; Zach, J.; Hroudova, J. 2016. The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building construction, *Energy and Building* 116: 45–48.
- Korjenica, A.; Petránek, V.; Zach, J.; Hroudová, J. 2011. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy and Buildings*. 43: 2518–2523.

- Kozłowski, R. 2000. Potential and diversified uses of green fibres, *Third International Wood and Natural Fibres Composites Symposium, 19th–20th September*, Kassel, Germany, 1–14.
- Lakin G. 1990. *Biometry*, Vysshaya Shkola, Moscow, 352 p. [in Russian]
- Latif, E.; Tucker, S.; Ciupala, M. A.; Wijeyesekera, D. C.; Newport, D. 2014. Hygric properties of hemp bio-insulations with differing compositions, *Construction and Building Materials* 66: 702–711.
- Lazko, J.; Landercy, N.; Laoutid, L.; Dangreau, L.; Huguet, M. H.; Talon, O. 2013. Flame retardant treatments of insulating agro-materials from flax short fibres, *Polymer Degradation and Stability* 98: 1043–1051.
- Le Duigou, A.; Davies, P.; Baley, C. 2009. Seawater ageing of flax/poly(lactic acid) biocomposites, *Polymer Degradation and Stability* 94: 1151–1162.
- Lee, S. H.; Wang, S. 2006. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37: 80–91.
- LST 1957, 2010. Durpės ir durpių produktai, skirti sodininkystei ir žemdirbystei. Tyrimo metodai, savybės, techninės tiekimo sąlygos, Vilnius: Lietuvos standartas, p. 19.
- Lunt, J.; Shefer, A. L. 2000. Polylactic acid Polymers from Corn. Applications in the Textiles Industry, *Journal of Industrial Textiles* 29(3): 191–205.
- Lvovsky, M. 1982. *Statistical methods for constructing empirical formulas*, Proc. Handbook, Higher School, 224 p.
- Malkapuram, R.; Kumar, V.; Yuvraj, S. N. 2008. Recent development in natural fibre reinforced polypropylene composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 28(10): 1169–1189.
- Manfredi, L. B.; Rodriguez, E. S.; Wladyka-Przybylak, M.; Vaquez, A. 2006. Thermal deradation and fire resistance of unsaturated polyester, modified acrylic resins and their composites with natural fibres, *Polymer Degradation and Stability* 91: 255–261.
- Mang, M. 2000. Poly(lactic acid): Performance Materials from Renewable Resources. *NPE 2000 Conference*, Chicago, IL.
- Mankowski, J.; Pudelko, K.; Kolodziej, J.; Karas, T. 2015. Effect of herbicides on yield and quality of straw and homomorphic fibre in flax (*Linum usitatissimum* L.), *Industrial Crops and Products* 70: 185–189.
- Manohour, K. 2012. Renewable Building Thermal Insulation – Oil Palm Fibre, *International Journal of Engineering and Technology* 2: 475–479.
- Mather, R. R.; Wardman, R. H. 2011. *The chemistry of Textile fibres*, Cambridge: RSC Publishing.
- Mažonienė, E.; Bendoraitienė, J. 2008. *Pluoštai*. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 116 p.

Mngomezulu, M. E.; John, M. J.; Jacobs, V.; Luyt, A. S. 2014. Review on flammability of biofibres and biocomposites, *Carbohydrate Polymers* 111: 149–182.

Mockapetris, P. 1963. *Linų rūšiavimas ir jų kokybės įvertinimas*. Valst. sp. „Pergalė“, Vilnius, 54 p.

Mohanty, A. K.; Manjusri, M.; Drzal, L. T. 2005. *Natural fibres, Biopolymers and Biocomposites*, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis group.

Mohanty, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T. 2001. Surface modifications of natural fibres and performance of the resulting biocomposites, an overview, *Composite Interfaces* 8(5): 313–343.

Mvubu, M.; Patnaik, A.; Anadjiwala, R. D. 2015. Process Parameters Optimization of Needle-punched Nonwovens for Sound Absorption Application, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 10(4): 47–54.

Mwaikambo, L. Y. 2006. Review of the history, properties and application of plant fibres, *African Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering Series* 7(2): 120–133.

Nicolajsen, A. 2005. Thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation materials, *Building and Environment* 40(7): 907–914.

Nykter, M. 2006. Microbial quality of hemp (*Canabis sativa* L.) and flax (*Linum usitatissimum* L.) from plants to thermal insulation. Academic dissertation.

Oh, S. Y.; Yoo, D. I.; Shin, Y.; Seo, G. 2005. FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide, *Carbohydrate Research* 340: 417–428.

Ohmura, T.; Tsuboi, M.; Tomimura, T. 2002. Estimation of the Mean Thermal Conductivity of Anisotropic Materials, *International Journal of Thermophysics* 23(3): 843–853.

Oksman, K.; Skrifvars, M.; Selin, J.-F. 2003. Natural fibres reinforcement in polylactic acid (PLA) composites, *Composites Science and Technology* 63: 1317–1324.

Oladele, I. O.; Agbabiaka, O. G. 2015. Effects of Alkalization of Sponge Fibre (*Luffa Cylindrica*) on the Mechanical and Water Absorption Properties of Reinforced Polypropylene Composites, *The Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago* 43(2): 4–8.

Oladele, I. O.; Omotoyinbo, J. A.; Adewara, J. O. T. 2010. Investigating the effect of chemical treatments on the constituents and tensile properties of sisal fibre, *Journal of Minerals and Materials Characterisation and Engineering* 9(6): 569–582.

Oldham, D. J.; Egan, C. A.; Cookson R. D. 2011. Sustainable acoustic absorbers from the biomass, *Applied Acoustics* 72: 350–363.

Pallesen, B. E. 1996. The quality of combine-harvested fibre flax for industrial purposes depends on the degree of retting, *Industrial Crops and Products* 5:65–78.

Patel, M.; Bhrambhath, D. *Nonwoven technology For Uncoventional fabrics*, DTT, BE in Textile Technology, M. S. University, Vadodara, 54 p.

- Pejic, B. M.; Kostic, M. M.; Skundric, P. D.; Prascalo, J. Z. 2008. The effects of hemi-celluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibres, *Bioresource Technology* 99: 7152–7159.
- Pickering, K. L.; Beckermann, G. W.; Alam, S. N.; Foreman, N. J. 2007. Optimising industrial hemp fibre for composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38(2): 461–468.
- Plackett, D.; Andersen, T. L.; Pedersen, W. B.; Nielsen, L. 2003. Biodegradable composites based on L-poly lactide and jute fibres, *Composites Science and Technology* 63: 1287–1296.
- Ramadevi, P.; Sampathkumar, D.; Srinisava, C. V.; Bennehalli, B. 2012. Effect alkali treatment on water absorption of single cellulosic abaca fiber, *Bioresources* 7(3): 3515–3524.
- Reti, C.; Casetta, M.; Duquesne, S.; Delobel, R.; Soulestin, J.; Bourbigot, S. 2009. Intumescent Biobased-Poly lactide Films to Flame Retard Nonwovens, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 4(2): 33–39.
- Rydin H.; Jeglum J. K. 2013. *The Biology of Peatlands*, Oxford University Press, 369.
- Saheb, D. N.; Jog, J. P. 1999. Natural fiber polymer composites: a review, *Advances in Polymer Technology* 18(4): 351–363.
- Sachs L. 1976. *Statistical Estimation*, Statistica, Moscow, 598 p. [in Russian].
- Sain, M.; Park, S. H.; Suhara, F.; Law, S. 2004. Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide, *Polymer Degradation and Stability* 83: 363–367.
- Saleem, Z.; Rennebaum, H.; Pudiel, F.; Grimm, E. 2008. Treating bast fibres with pectinase improves mechanical characteristics of reinforced thermoplastic composites, *Composites Science and Technology* 68: 471–476.
- Savickis, J. 1988. *Linų ir cheminių pluoštų verpimas. Ilgo linų pluošto šukavimas, sluoksnos formavimas*, Lietuvos TSR liaudies švietimo ministerijos Leidybinė redakcinė taryba, Vilnius. 47 p.
- Saw, S. K.; Puwar, R.; Nandy, S.; Ghose, J.; Sarkhel, G. 2013. Fabrication characterisation and evaluation of luffacylindrica fiber reinforced epoxy composites, *Bioresources* 8(4): 4805–4826.
- Schamack, G.; Tändler, B.; Vogel, R.; Beyreuther, R.; Jacobsen, S.; Fritz, H-G. 1999. Biodegradable fibers of poly(L-lactide) produced by high-speed melt spinning and spin drawing, *Journal of Applied Polymer Science* 73: 2785–2797.
- Sedush N. G. 2015. Kinetics of polymerization of lactide and glycolide, properties and biomedical applications of the polymers, Academic dissertation, Moscow.
- Shahzad, A. 2011. Hemp fiber and its composites – a review, *Journal of Composite Materials* 46(8): 973–986.

- Small, E.; Marcus, D. 2002. Hemp: A New Crop with New Uses for North America. *Trends in New Crops and New Uses*, ASHS Press, Alexandria, VA: 284–326.
- Sokal R. R.; Rohlf, F.J. 1998. *Biometry. The principles and practice of statistics in biological research*, New York: W.H. Freeman and Company, 887 p.
- Spychalski, G. 2014. Selected Factors of Fibrous Plant Production in Poland, *Journal of Natural Fibers* 11(3):1–14.
- Staiger, M. P.; Tucker, N. 2008. *Natural-fibre composites in structural application*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 269–300.
- Stanys, S.; Adomavičiūtė, E.; Jonaitienė, V. 2012. *Neaustinės medžiagos*, I dalis. Technologija, Kaunas.
- Stankovic, S. B.; Popovic, D.; Poparic, G. B. 2007. Thermal properties of textile fabrics made natural and regenerated cellulose fibres, *Polymer Testing* 27: 41–48.
- Stauskis, V. J. 2007. *Statybinė akustika*. Vilnius: 266 p.
- Sujetovienė G. 2012. *APL 3003 Dirvožemio ekologija, Praktiniai darbai*, Vytautas Magnus University, Kaunas. 123 p.
- Širšinaite, K.; Puodžiukynas, R. 1995. Thermal insulating materials, method of production and the use. Lithuania Patent No. 3438.
- Tahir, P. Md.; Ahmed A. B.; SaifulAzry, S. O. A.; Ahmed, Z. 2011. Retting process of some bast plant fibres and its effect on fibre quality: a review, *Bioresources* 6(4): 5260–5281.
- Takagi, H.; Kako, S.; Kusano, K.; Ousaka, A. 2007. Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites, *Advanced Composite Materials* 16(4): 377–384.
- Thomsen, A. B.; Rasmussen, S.; Bohn, V.; Nielsen, K. V.; Thyngensen, A. 2005. Hemp raw materials: The effect of cultivar, growth conditions and pretreatment on the chemical composition of the fibres. *Biosystems Department*.
- Toropovs N.; Korjamins A.; Shakhmenko G.; Kara P. 2012. Granulated ecological thermal insulation material based on peat binder, *In: Riga Technical University 53rd International Scientific Conference*: Latvia, Riga, 11–12, 390–390.
- Vėjelis, S.; Vaitkus, S.; Lekūnaitė–Lukošiūnė L.; Stapulionienė, R.; Valivonis, J. 2015. Assessment of structure and moisture influence on the properties of loose-fill cellulose insulation, *Environmental Engineering and Management Journal*.
- Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I. 2003. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics, *Composites Science and Technology* 63(9): 1259–1264.
- WeiDong, Y.; Yan, L. 2012. Sound absorption performance of natural fibers and their composites, *Science in China Series E: Technological Sciences* 55(8): 2278–2283.
- Weightman, R.; Kindred, D. 2005. Review and analysis of breeding and regulation of hemp and flax varieties available for growing in the UK. Final report for The Depart-

ment for Environment Food and Rural affairs. ADAS UK Ltd: The Department for Environment Food and Rural affairs.

Wichman, I. S. 2003. Material flammability, combustion, toxicity and fire hazard in transportation, *Progress in Energy and Combustion Science* 29: 247–299.

Xiang, H.-F.; Wang, D.; Lui, H.-C.; Zhao, N.; Xu, J. 2013. Investigation on sound absorption properties of kapok fibers, *Chinese Journal of Polymer Science* 31(3): 521–529.

Zach, J.; Brozovsky, J.; Hroudova, J. 2010. Research and development of thermal-insulating materials based on natural fibres, *The 10th International Conference, Modern Building Materials, Structures and Techniques*, Vilnius, 330–334.

Zach, J.; Hroudova, J.; Brozovsky, J. 2014. Study of hydrothermal behavior of thermal insulating materials based on natural fibers, *International Journal of Architectural and Environmental Engineering* 1(9): 947–950.

Zach, J.; Hroudova, J.; Brožovsky, J.; Zdenek, K.; Gailius, A. 2013. Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems, *Procedia Engineering* 57: 1288–1294.

Zach, J.; Korjenic, A.; Petranek, V.; Hroudova, V.; Bednar, T. 2012. Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool, *Energy and Buildings* 49: 246–253.

Zach, J.; Brozovsky, J.; Gailius, A. 2011. Utilization of alternative raw material sources from agriculture from the production of insulating materials, *The 8th International Conference*, 461–464.

Zaikov, G. E.; Lomakin, S. M. 2002. Ecological Issue of Polymer Flame Retardancy, *Journal of Applied Polymer Science* 86: 2449–2462.

Zulkifli, R.; Mohd, N.; Jailani, M.; Ismail, A. R.; Nuawi, M. Z. 2009. Comparison of Acoustic Properties between Coir Fiber and Oil palm Fiber, *European Journal of Scientific Research* 33(1): 144–152.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Stapulionienė, R.; Tupčiauskas R., Vaitkus, S.; Vėjelis, S. 2016. Development and investigation of thermal insulation from hemp-poly lactide fibres, *Engineering Structures and Technologies*, 8(1): 23–30, ISSN 2029-882X / Eissn 2029-8838.

Stapulionienė, R.; Vaitkus, S.; Kremensas, A. 2015. Thermal conductivity investigation of composite from hemp and peat fibres, *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(9): 2213–2220, ISSN 1582-9596.

Vaitkus, S.; Karpavičiūtė (Stapulionienė), R.; Vėjelis, S.; Lekūnaitė, L. 2014. Development and research of thermal insulation materials from natural fibres, *Key Engineering Materials. Engineering Materials & Tribology XXII*. Zurich: Trans Tech Publications Ltd 604: 285–288. ISSN 1013-9826.

Straipsniai kituose leidiniuose

Karpavičiūtė (Stapulionienė), R. 2013. Birių pluoštinių medžiagų tankio poveikio šilumos laidumui įvertinimas. *16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietu-vos ateitis“ 2013 metų teminės konferencijos „Statyba“ (2013 m. kovo 20-22 d.) straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-7149, 1–5.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Recently, natural fibres are becoming more and more popular and their significance to the industry is increasing as well. There are about 100 types of plants having a long and strong fibre, suitable for the industrial recycling, and capable of growing in average climate conditions. The natural environmental conditions in Lithuania are favourable to grow for such fibre plants as flax, hemp, nettle, hops, and others. These fibres have been used for centuries for various reasons: for making ropes and paper, for weaving sails and other strong textile products. In the last two decades, natural fibres are more widely used in thermal insulation materials production too. It was brought to attention that thermal insulation materials have good thermal insulating properties in comparison to glass fibre; what is more, these fibres use less chemical materials in producing process and energy requirements are ten times lower. Also, the product, made of natural fibre, can be recycled for several times, and eventually, easily utilized, when it becomes non-recyclable.

Approximately one million hectare is suitable for flax in Lithuania, however, this potential is unexploited due to following reasons:

- costs exceed the earnings from harvest (five times more labour is necessary for flax harvesting than for grain harvesting);
- there is no demand for short flax fibres, i.e. long fibres are used in textile industry;

- cheap import of fibres and flax products from third countries.

Hemp is one of the oldest grown plants known in agriculture. In Lithuania cultivation of hemp fibre plants were legalized in 2014. So, experience in growing and recycling such plants is not much, also there is too low supply for wider use for this reason, there is no factories recycling hemp to fibre in our country. In Lithuania fibre hemp is grown for seeds from which oil is made. To do such production there is no need for big investments in comparison to fibre making equipment. In Lithuania growth area of fibre hemp have growing tendency. In 2014 1063 ha were grown, where 308 ha were dedicated for fibre, 2015 year – 1500 ha. Hemp is much easier to grow than flax, and harvest of such fibre is three times bigger from the same area.

In this work possibility of creation of effective thermal insulation material from hemp fibres is examined. For processing raw materials different technological solutions are used. Thermal characteristics of hemp fibres and their composites can be improved through creating optimal micro and macro structure. There were examined such technological factors as, mechanical processing of fibres, composite thermal treatment and its effect for fibre and its composite structure and features. Also, effect of additives such as hydrophobizer and flame retardants on the composite physical and mechanical properties was inspected.

The relevance of the thesis

Ecological materials industry is rapidly growing in the last two decades. Growth of this industry is related to few factors – environmental protection aspect, effect for environment and human health, lowering use of ground resources and utilization of materials at the end of exploitation cycle. Environmental protection questions determined huge interest in new composite materials, made from biologically clear raw materials, such as natural fibre, which are great alternative for synthetic fibre. Right now people discover even more natural, renewing plant origin raw materials – hemp fibre, flax, straw, corn, and others, from which self-decomposition material are made, for example: boards, mats, biopolymers and bioplastics. Ecological compatibility determines biodecompositivity (ability to self-disintegrate, affecting with natural microorganisms), and also safe and harmless production of it.

So, use of natural based fibre – hemp, would create more possibilities to produce effective, ecological thermal insulation products, which would solve lack of raw material, use of local renewable resources, recycling of different materials and environmental safety problems.

Also hemp fibre – is counterweight for global warming problem because 1 ha of fibred plants on vegetation period absorbs about 2.5 t CO₂ (Spychalski 2014). Biomass productivity of fibre hemp is huge, even 2–2.5 times bigger than from the same area of forest (Kozłowski 2009).

In order to implement such innovative solutions in environmental and building sectors e.g. to install energetically effective thermal insulation materials in building industry, scientific research is required. Most of scientific researches in this area by scientists through last decades were made. In order to obtain such thermal insulation material for installation of partitions in frame type buildings, is favorable to use hemp fibre and

polyactide fibre binder, which is made from plant products – corn – biotechnological method. It is alternative for biological non divisible synthetical fibres.

Object of the thesis

Object of the thesis – natural fibres (hemp, flax, peat); thermal insulating composite from hemp fibres and peat fibres binder; and binders – polyactide fibres and peat fibres, thermal insulating composite from hemp fibres and binder of PLA and composite properties improving additives – flame retardants and hydrophobizers.

Aim of the thesis

The basic aim of this research is to develop thermal insulating composite of fibrous structure, choosing plant-based fibres, the appropriate fibrous binder and additives, increasing the effect of resistance on water absorption and fire for its production.

Objectives of the thesis

1. To investigate the effect of mechanical treatment (chopping, milling, combing) on physical properties of raw materials.
2. To choose appropriate mechanical processing method of fibres and natural fibres for development of thermal insulating composite.
3. To choose the appropriate binder and the amount of it for production of composite.
4. To determine the effect of composite from fibre plants of formation structure on properties of physical and mechanical.
5. To investigate the effect of hydrophobizers and flame retardants on material's water absorption and flammability.

Research methodology

These methods were applied for natural fibres and their composite: determination of thermal conductivity, short-term water absorption, water vapour transmission, sound absorption, compressive stress, tensile strength; investigations on flammability. In processing of experimental data mathematical – statistic models were used. For structural research optical and scanning electron micro-copy analysis methods were used.

Scientific novelty of the thesis

1. The impact of methods of different mechanical processing (chopping, milling, combing) on thermal conductivity of fibre materials is evaluated. Mechanical processing methods of used natural fibres allow to form and choose suitable macro- and microstructure, which determines a low thermal conductivity coefficient.
2. Rational properties of hemp fibres, allowing formation the composite with optimal macro- and microstructure ensuring the smooth mixing with PLA are determined. Controlling treatment method and yield of fibres, chopped hemp fi-

bres (2–3 cm) were derived, which are suitable for production of effective thermal insulating composite.

3. Using carding technology, physical-mechanical properties of thermal insulating composite made from plant-based fibres and binder of PLA were determined. Carding method allows to form effective thermal insulating material in technology line of nonwovens.
4. Effect of additives of hydrophobizer and flame retardants on water absorption and flammability of materials is determined. In order to improve hydrophobizing and fire retardant properties of natural fibres, hydrophobizers and fire retardants used in textile industry may be used. Selection of suitable additives allow to reduce water absorption and flammability of thermal insulating materials.

Practical value of the research findings

Developed thermal insulating composite from hemp fibres and binder as polyactide fibres may be produced in technological line of nonwoven materials. Developed effective, ecological, thermal insulating materials can be used to insulate heat and insulate sound for building envelope of frame constructions and in constructions for non bearing application.

Defended statements

1. Mechanical processing (chooping, milling, combing) of natural fibres allows controlling macro- and microstructure and physical properties of raw material for thermal insulation.
2. The selection of forming composition, hardening regime and additives allows controlling the physical-mechanical properties of thermal insulating composite made from plant-based fibres.

Approval of the research findings

4 scientific articles are published on the topic of the dissertation: one in scientific journal included in the Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science) with a citation index, two – in scientific journals of international databases; one – in the Lithuanian conference proceedings. Results of this thesis were presented in 5 conferences in Lithuania and other countries.

Structure of the dissertation

The thesis consists of introduction, three chapters, general conclusions and two annexes. The volume of the thesis is 125 pages excluding annexes. 37 numbered equations are used in the text, 45 figures and 18 tables. 144 references are used when writing the thesis.

1. Review of the use of materials from fibrous plants for thermal insulating composites manufacture

Review of literature has shown that the biggest part of natural fibres consists of bast fibres. Such fibres have good thermal insulating properties because of its structural speciality (porosity, little diameter and low density) and chemical composition. Microstructure of fibre depends on methods of preparation, origin of fibres. During the literature review it was found that natural fibres: hemp, flax, others and its composite with different binders, which can be mixed with different natural fibres, are suitable for thermal insulating materials, because of its thermal and ecological properties. Also it was determined that natural fibres are suitable for production of sound insulating materials because of good sound absorbing properties. Natural fibres and its' composites have a high water absorption and low resistance to fire. Therefore, it is necessary to use different additives and technological processes, which allow to reduce water absorption and flammability of material.

2. Materials and research methods of natural fibres and their composites

For research mechanical processing types of natural fibres were chosen – chopping, combing and milling, which determines micro and macrostructure of natural fibres. During investigation it was determined that yield of natural fibres processed by various methods is different.

Research on natural fibres and its composites properties is done in accordance with standardized methods as follows: LST EN 12667:2002 „Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance”; LST EN 1609:2013 „Thermal insulating products for building applications – Determination of short term water absorption by partial immersion”; LST EN ISO 11925-2:2010 „Reaction to fire tests - Ignitability of products subjected to direct impingement of flame – Part 2”; LST EN ISO 10534-1:2002 „Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes – Part 1; LST EN 826:2013 „Thermal insulating products for building applications – Determination of compression behaviour”; LST EN 1608:2013 „Thermal insulating products for building applications – Determination of tensile strength parallel to faces”; LST EN 1607:2013 „Thermal insulating products for building applications – Determination of tensile strength perpendicular to faces”.

For processing of experimental data and evaluation of their reliability mathematical–statistical methods were used. In order to evaluate the structure of material optical and scanning electron microscope analysis methods were used.

Thermal insulating composite was formed from natural fibres (hemp and binder – peat). Hemp – peat fibres composite specimens were produced from 50% hemp fibres and 50%, and certain amount of water which is necessary for the activation of peat fibres. Fibre peat mass was stirred in the water and then poured into mixing machine, and stirred until the solid mass was obtained. Activation of peat in the water was used to

The hemp-poly(lactide) webs in ratios 89:11 and 85:15 were produced by carding technique in JSC Neaustima, Lithuania. During carding process mixed fibres were combed into the same direction, to create composite webs. The resulting web of aligned fibres was then cross laid into several layers that overlapped. The degree of overlap depended on the desired density of the product. Prepared webs were conveyed through an oven to allow PLA to melt. The thickness and density of composite was controlled by two drums, through which material was conveyed. After compression between drums material was conveyed out from oven and natural cooled in ambient air temperature to provide dimension stability to the product. Thermally treated composite was cut to the required length and width.

In order to reduce water absorption of the composite made from hemp and PLA fibres, in our experiments three types hydrophobizers were used: Beiphob FR, Tubiguard 13, Tubiguard 21. Selecting hydrophobizers it was taken into account its' suitability with natural fibres, its' processing temperature and suitability for coating materials by immersion and by spraying methods. For experiments three samples with different concentration of hydrophobizers were prepared (Table. S1).

Hydrophobyzers	Concentration of hydrophobizator, g/l			
Beiphob FR	0.25	0.75	1.25	1.75
Tubiguard 13				
Tubiguard 21				

For experiments two types of fire retardants were chosen – Flovan CGN and Apyrol BKW. Selecting flame retardants two main conditions were taken into account – whether there are suitable for coating materials by immersion and by spraying methods as well as their minimal impact on the environment. For test six specimens were prepared with different concentration of chosen fire retardants (Table. S2). Additionally flammability of pure hemp and polyactide fibres were determined.

Flame retardants	Concentration of flame retardants, g/l						
Flovan CGN	0	5	15	25	35	45	55
Apyrol BKW							

3. Results of experimental investigations of structural, thermal and strength indicators of fibres and their composites

Thermal conductivity coefficients of natural fibres, processed mechanically by different methods, were investigated (Fig. S1).

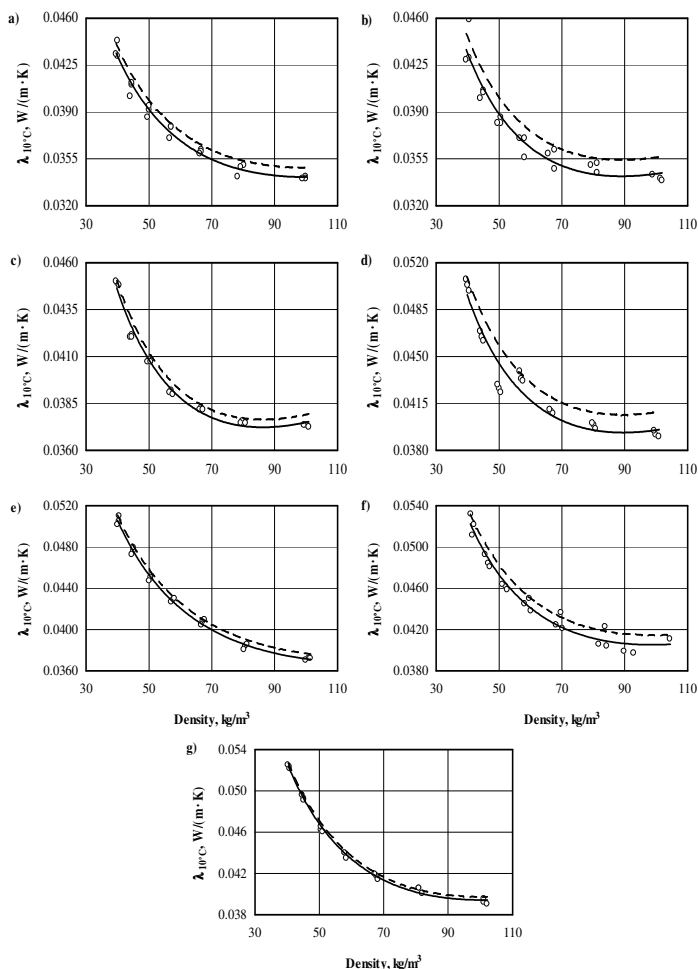


Fig. S1. Relationship between thermal conductivity and density of specimens from flax and hemp fibres processed by different mechanical methods: a) combed flax fibres (2–3 cm); b) combed flax fibres (5–7 cm); c) flax fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts twice; d) flax fibres (5–7 cm) processed mechanically by toothed shafts twice; e) combed hemp fibres (2–3 cm); f) combed hemp fibres (5–7 cm); g) hemp fibres (2–3 cm) processed mechanically by toothed shafts twice; ○ – experimental data; (—) – regression lines; (---) – prediction lines

The best values of thermal conductivity coefficient of the formed combed natural fibres specimens were obtained. The thermal conductivity coefficient of the combed natural fibres specimens varied in the interval of 0.0347–0.050 W/(m·K) at the density range of 40–100 kg/m³. However such mechanical processing of natural fibres requires energy consumption, also the large amount of the raw material is lost. Therefore, the most economical way is to produce short fibres, processed mechanically by toothed shafts twice. The values of thermal conductivity coefficient between combed and short natural fibres differ not significantly – the coefficient of thermal conductivity varied in the interval of 0.039–0.053 W/(m·K).

The thermal conductivity of the investigated natural fibres depends not also on the density and structure of formed fibre specimens.

In the performed investigations, the type of relationship between variables (thermal conductivity at mean temperature 10 °C and density of natural fibres) was taken according to equation:

$$\bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}} = b_0 + b_1 \cdot \rho + \frac{b_2}{\rho}, \quad (\text{S.1})$$

where $\bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}}$ is thermal conductivity at the mean temperature of measurement 10 °C in W/(m·K); ρ is density of natural fibres in kg/m³; b_0 , b_1 , b_2 – constant coefficients.

The mathematical – statistical analysis of experimental results of flax and hemp fibres specimens revealed the dependence of density ρ , kg/m³ and thermal conductivity coefficient $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}$, W/(m·K), determined by regression equations (S.2–S.8). The statistically processed results of experimental values of thermal conductivity coefficient for flax and hemp fibres specimens are presented in Tables S3.

Table S3. Results of statistical processing of thermal conductivity of hemp and flax fibres

Regressive equation No.	Identification No.	According to (S.1) equation estimated (S.2) and (S.8) regressive equations stable coefficients			S_r , W/(m·K)	$\eta_{y \cdot x}^2$	$\delta^* = t_{\alpha} \cdot S_r$, W/(m·K)
		b_0	b_1	b_2			
(S.2)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ combed flax fibres with the length of 2–3 cm						
	21	0.01437	0.000098	0.9955	0.000528	0.976	0.000699
(S.3)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ combed flax fibres with the length of 5–7 cm						
	21	0.00697	0.000153	1.2112	0.000925	0.932	0.001225
(S.4)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ flax fibres with the length of 2–3 cm**						
	21	0.01361	0.00014	1.0172	0.000313	0.987	0.000414
(S.5)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}C} \rightarrow \rho$ flax fibres with the length of 5–7 cm**						
	21	0.00962	0.000166	1.3291	0.001002	0.936	0.001326

End of Table S3

(S.6)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}} \rightarrow \rho$ combed hemp fibres with the length of 2–3 cm						
	21	0.01716	0.000079	1.2092	0.000395	0.934	0.000523
(S.7)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}} \rightarrow \rho$ combed hemp fibres with the length of 5–7 cm						
	21	0.01229	0.000143	1.3935	0.000712	0.972	0.000942
(S.8)	$\bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}} \rightarrow \rho$ hemp fibres with the length of 2–3 cm**						
	21	0.01031	0.00014	1.4627	0.000232	0.997	0.000307

Note). *) – one sided confidence interval of prognostic evaluation of results which probability $P = (1 - \alpha) = 0.90$, $\lambda_{10^{\circ}\text{C}}^{\text{prog.}} = \bar{\lambda}_{10^{\circ}\text{C}} + \delta$. **) – after mechanically processing by toothed shafts twice.

The constant coefficients b_0 , b_1 , b_2 of regression equations (S.2–S.8) for relationship (S.1) were calculated, also the mean standard deviations S_r , determination coefficients $\eta_{y,x}^2$ and δ values were estimated to predict the values of unilateral confidence interval of thermal conductivity coefficient at the $P=0.90$ reliability. It should be noted, that determination coefficients of regression equations (S2–S8) range from 0.819 to 0.996 and considerably exceed the threshold (lower limit) $\eta_{y,x}^2$ values, calculated by corresponding n values at the confidence level of 90% (Sachs, 1972).

For future research short hemp fibres (2–3 cm), processed mechanically by toothed shafts twice, were selected, because of the fact that larger amount of fibre yield from fibre hemp than from fibre flax is obtained.

Specimens from hemp and peat fibres were formed for investigations of thermal conductivity. The coefficients of thermal conductivity of the composite varied in the interval of 0.0436–0.0481 W/(m·K) at the density of 173–186 kg/m³. Analysis of experimental data has shown that thermal conductivity of the composite from hemp and peat fibres has increased by 10.3 % with the increase in density (from 173 kg/m³ to 186 kg/m³) by 7.5 %. It can be stated that coefficient of thermal conductivity of the composite from natural fibres depends on its' density and structure. However, such formation of the composite requires high energy consumption. For reduction of energy consumption that needs for drying of the composite after activation of fibres in water, more effective technological processes must be used, e.g. vacuumation technology.

Also, experimental investigations on properties of the composite from hemp fibres and PLA were carried out.

Figure S2 presents the values of compressive strength. The conducted analysis of experimental data for fibrous composite shows that the orientation of fibres in specimens has great impact on compressive strength. The research of compression for fibrous composite with 11% of PLA shows (Fig. S2) that the average value of compressive stress under compression perpendicular to forming direction makes 0.402 kPa, across – 1.48 kPa and parallel – 1.51 kPa. The compression results analysis of fibrous composite with 15% of PLA shows (Fig. S2) that the average values of compressive stress perpendicular, across and parallel to forming directions make, respectively, 0.581 kPa, 3.92 kPa and 4.70 kPa.

The difference of compressive stress values for fibrous composite with 11% and 15% of PLA under compression across to forming direction and specimens under compression parallel to forming direction is quite high – respective values differ by ~3.1 times. An increase in compressive stress is determined not only by forming direction of specimens but the amount of binding material, distribution uniformity in a whole product volume, strength of interfacial adhesion between binding material and hemp fibres as well.

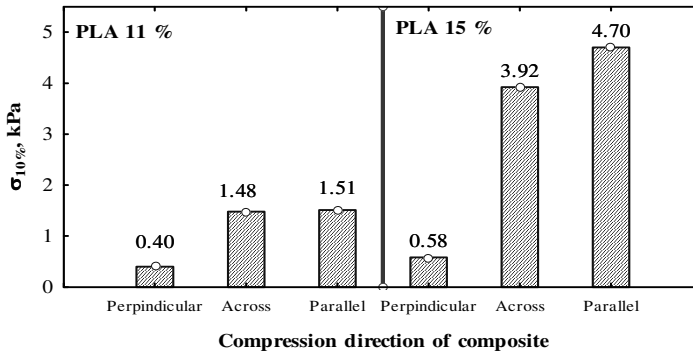


Fig. S2. The impact of compressive load direction towards fibres orientation on compressive stress of fibrous composite

The analysis of experimental data shows that orientation of layer has great influence on tensile strength (Fig. S3). After comparison of fibrous composite specimens with 11% and 15% of PLA, it is determined that:

- tensile strength perpendicular to forming direction is increased by ~2.4 times;
- tensile strength across to forming direction is increased by ~1.8 times;
- tensile strength parallel to forming direction is increased by ~1.6 times.

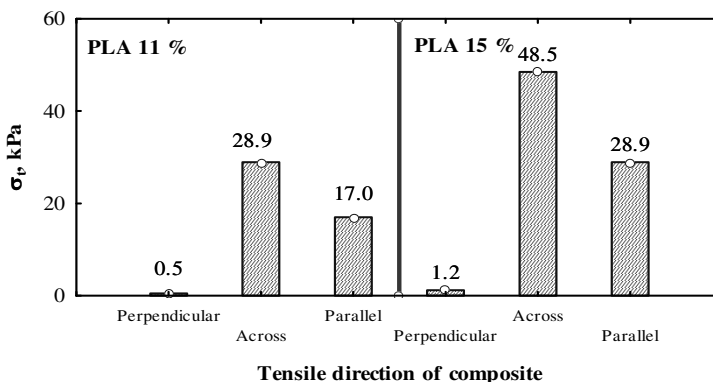


Fig. S3. The impact of tensile load direction towards fibres orientation on tensile strength of fibrous composite

This way, increasing the binding material amount in fibrous composite from 11% to 15%, by ~2.0 times higher tensile strength in all forming directions is obtained.

As it can be seen from Fig. S4 the tendencies for thermal conductivity reduction are similar to fibrous composites with 11% of PLA and 15% of PLA. Comparing hemp fibre composite specimens with 11% of PLA and with 15% of PLA, when the density of material is 40 kg/m³, the values of thermal conductivity differentiate only ~1.01 times; when the density of material is 90 kg/m³, the values of thermal conductivity differentiate only ~1.02 times. It may be concluded that the impact of binding material amount on thermal conductivity is not significant.

Thermal conductivity coefficients were expressed by regression equations (Table S4).

Table S4. Results of statistical processing of thermal conductivity of fibrous composite

Regressi- ve equa- tion No.	Identifi- cation No.	According to (S.1) equation estimated (S.9) and (S.10) regressive equations stable coefficients			S_r , W/(m·K)	$\eta^2_{y \cdot x}$
		b_0	b_1	b_2		
(S.9)	24	0.0368	-0.000005	0.0797	0.000528	0.579
(S.10)	24	0.0375	-0.000016	0.0581	0.000461	0.650

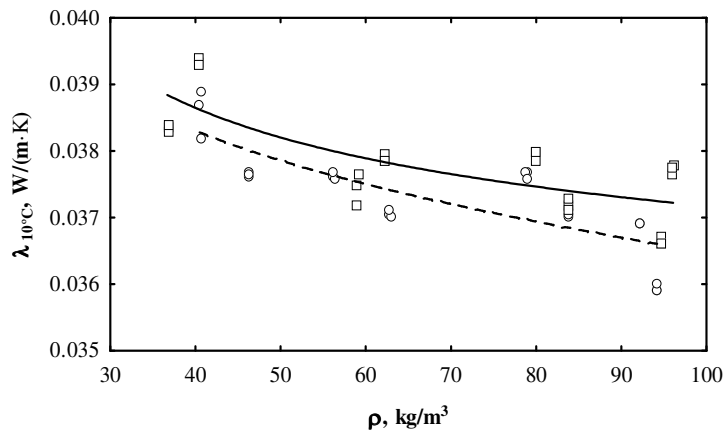


Fig. S4. The dependence of thermal conductivity on density of fibrous composite:
□ – eksperimental data (11% of polylactide fibres binder); ○ – experimental data (15% of polylactide fibres binder); (—) – average values according to regression equation (S.9);
(- - -) – average values according to regression equation (S.10) (Table S4)

Conducted research on strength and thermal insulating properties has shown that optimal characteristics are obtained for fibrous composite with 15% of PLA Therefore, fibrous composite with 15% of PLA is used for further investigations.

Determination of sound absorption coefficient for fibrous composite was conducted at frequencies ranging from 125 Hz to 2000 Hz (Fig. S5).

Experimental data have shown (Fig. S5) that, when the density of material is 20 kg/m^3 , sound absorption coefficient linearly increases with the increase in frequency. When the density of material increases from 40 kg/m^3 to 100 kg/m^3 sudden growth in sound absorption coefficient can be observed. It continues until the frequency of $\sim 1000 \text{ Hz}$ is reached. Further increase in frequency, i.e. from 1000 Hz to 2000 Hz , does not significantly change sound absorption coefficient.

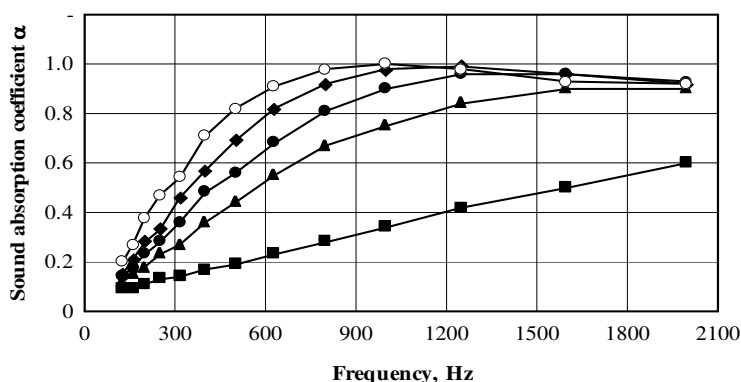


Fig. S5. Kinetics of sound absorption coefficient of the composite made from hemp fibres and 15% binder of polylactide fibres as a binder (density, kg/m^3 , ■ – 20; ▲ – 40; ● – 60; ◆ – 80; ○ – 100)

Sound absorption coefficient of fibres and fibrous composites depends on various factors: density of the material, thickness, structure, size of the pores, orientation of fibres and etc. (Berardi, Iannace 2015; Xiang *et al.* 2013; Beghi 2013).

Fig. S6 presents dependence of short-term water absorption on hydrophobizing additives and their concentration. In order to reduce short-term water absorption, three types of hydrophobizers, having different concentrations, are chosen.

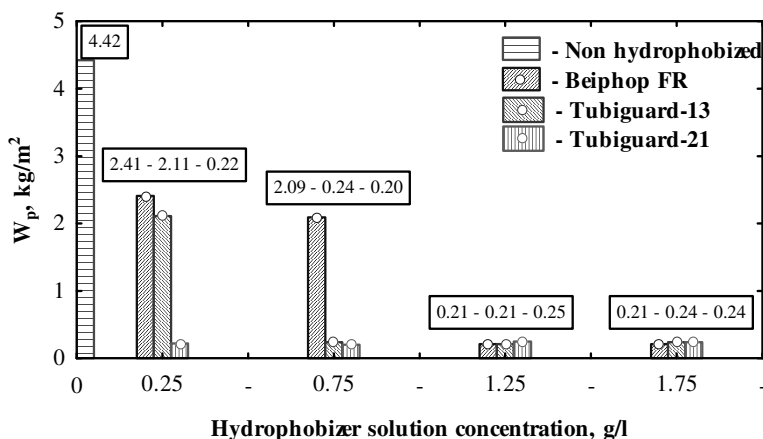


Fig. S6. Effect of hydrophobizer on water absorption of fibrous composite

It is determined that water absorption may be highly reduced, i.e. up to 20.1 times, by treating composite with hydrophobizer with concentration of 0.25 g/l. Increasing concentration up to 1.25 g/l shows the same reduction in water absorption; increasing concentration up to 1.75 g/l, water absorption is not changed. The best results are obtained for composites with Tubiguard 21 and 13 hydrophobizers, however, the most appropriate hydrophobizer is Beiphob FR due to its C6 chain which is less harmful to the environment compared to other two hydrophobizers.

Fig. S7 presents the microstructure comparison of untreated and treated hemp fibres composite and PLA with 1.25 g/l concentration of hydrophobizer. The conducted analysis of microstructure shows (Fig. S7 a) that untreated hemp fibres are covered by fine plant-based particles which occur due to mechanical treatment of fibres. It can be seen as well that the surface of hemp fibres is rough and corrugated. Fig. S7 b presents that the surface of hemp fibres, which is treated by 1.25 g/l concentration of hydrophobizer Beiphob FR, is covered by film which binds all dust and fills cavities. This evenly covering film does not allow penetration of water, thus reducing short-term water absorption.

It can be observed from the microstructure (Fig. S7 c) that PLA have smooth surface through whole fibre length but the surface of PLA treated with hydrophobizer is not so smooth Fig. S7 d – fibres are covered with fine particles of hemp fibres which are bound by hydrophobizing film.

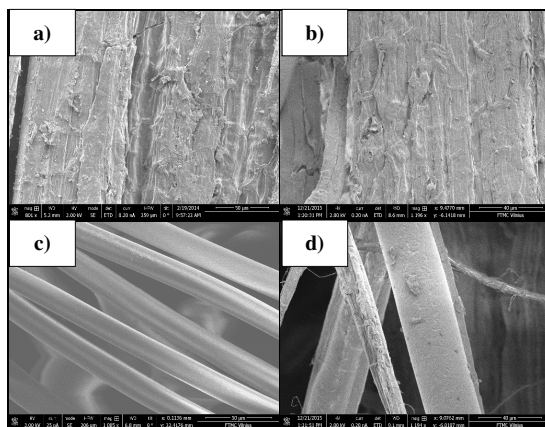


Fig. S7. Magnified microstructure of hemp fibres and polyactide fibres: a) untreated hemp fibres ($\times 800$); b) hemp fibres treated with 1.25 g/l concentration of hydrophobizer Beiphob FR ($\times 1196$); c) untreated polyactide fibres ($\times 1005$); d) polyactide fibres treated with 1.25 g/l concentration of hydrophobizer Beiphob FR ($\times 1194$)

Fire testing has been conducted as well, whereas most of the organic materials are characterized by high flammability. Mass losses are successfully reduced by 96.5% when 45 g/l concentration of fire retardant is used.

General conclusions

1. On the basis of macro- and microstructure research, it is determined that mechanically treated natural fibres – by combing, chopping, milling, make dimensional carcass of fibres, are characterized by totality of thin fibres and small pores and determine the values of thermal conductivity. Different mechanical treatment for natural fibres provides with density ranging from 40 kg/m^3 to 100 kg/m^3 and thermal conductivity – from $0.0335 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ to $0.0592 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

1.1. Combing gives the best macro- and microstructure which determine the lowest thermal conductivity due to formation of dimensional carcass – very thin fibres having the size of $20\text{--}140 \text{ }\mu\text{m}$, lots of fine air gaps and intersections between fibres. Thermal conductivity of combed natural fibres (length – $2\text{--}7 \text{ cm}$) ranges from $0.0539 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ to $0.0335 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, when the density varies from 40 kg/m^3 to 90 kg/m^3 .

1.2. Chopping gives optimal macro- and microstructure – dimensional structure consisting of thin fibres (diameter is $40\text{--}450 \text{ }\mu\text{m}$, length – $2\text{--}7 \text{ cm}$) and fine air gaps. Such structure determines somewhat lower thermal conductivity compared to combed hemp fibres. It varies from $0.0539 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ to $0.0375 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ at the density range of $40\text{--}90 \text{ kg/m}^3$.

1.3. Milling – gives undesirable macro- and microstructure which determine the highest thermal conductivity due to appearing dusts as well as increased area of contact zones. Thermal conductivity of milled natural fibres (length $\leq 2 \text{ cm}$) ranges from $0.0490 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ to $0.0438 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ at the density range of $40\text{--}90 \text{ kg/m}^3$.

1.4. Comparing values of thermal conductivity coefficient of natural fibres and fibres yield under different mechanical processing, it was determined, that short fibres are optimal for production of thermal insulating material.

2. Using mechanical processing – milling – it was derived peat fibres, which is suitable for formation of web and as a binder for production of composite. Peat fibres have a good macro- and microstructure and low thermal conductivity coefficient. Meanwhile, high time, labor and energy consumptions are incurred during preparation of specimens.

2.1. Milling peat, it is derived peat fibres, which length is less than 2 cm , diameter – $10\text{--}125 \text{ }\mu\text{m}$. Thermal conductivity coefficient of formed web of peat fibres ranges from $0.050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ to $0.037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ at the density range of $40\text{--}70 \text{ kg/m}^3$. However, yield of peat fibres reaches only 20% during mechanical processing.

2.2. Using peat fibres as a binder and chopped hemp fibres ($2\text{--}3 \text{ cm}$), the composite in which intermesh contact zones are formed, is developed. The composite is characterized by low thermal conductivity coefficient – $0.0436\text{--}0.0481 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, when the density ranges from 173 kg/m^3 to 186 kg/m^3 . However, it is required high time and energy consumptions for production of the composite, because specimens are dried for 48 hours at $70 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature.

3. Proper selection of natural fibres, mechanical treatment, binding materials, technological parameters (curing regimes) and concentrations as well as types of additives which reduce water absorption and flammability of composite allow development of optimal structure which determines sufficient physical-mechanical properties of the composite.

3.1. Increased amount in PLA from 11% to 15% by until 2.4 times increases the tensile strength perpendicular to forming direction of fibrous composite, by until 1.8 times – across to forming direction and by until 1.6 times – parallel to forming direction; by until 1.2 times increases compressive stress under compression perpendicular to forming direction, by until 3.1 times – across and parallel to forming directions. Therefore, when the direction of fibres in the structure and the amount of binding material are adjusted, the products with different strength characteristics may be obtained.

3.2. Composite from chopped fibres with 15% of PLA assure low thermal conductivity ranging from 0.0383 W/(m·K) to 0.0367 W/(m·K) when density varies from 40 kg/m³ to 90 kg/m³, and high sound absorption coefficient ranging from 0.34 to 1.0 when frequency is 1000 Hz and density varies from 20 kg/m³ to 100 kg/m³.

3.3. Proper selection of hydrophobizer type and its concentration used for treating process allow 21 times reduction in water absorption. Proper selection of flame retardants type and its concentration allow reduction in mass loss on ignition up to 96.5%. It is determined that rational concentration of hydrophobizer is 1.25 g/l and for flame retardant – 45 g/l.

Priedai¹

A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Rūta STAPULIONIENĖ

TERMOIZOLIACINIO KOMPOZITO IŠ PLUOŠTINIŲ AUGALŲ KŪRIMAS IR TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (08T)

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THERMAL INSULATING COMPOSITE
FROM FIBROUS PLANTS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2016 05 05. 12,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius